



Universidad  
Carlos III de Madrid

INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

CARACTERIZACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE  
CALOR PARED-LECHO Y ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA  
COMPRESIBILIDAD DEL GAS EN UN LECHO  
FLUIDIZADO MEDIANTE SIMULACIÓN CFD

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS

AUTOR: Víctor García García

TUTOR: Antonio Acosta Iborra

Leganés, Octubre de 2014





## Agradecimientos

Agradezco a mi familia y a mis amigos por todo su apoyo durante todo el tiempo empleado en mis estudios. A mi tutor, por su paciencia y ayuda cuando la necesitaba.





## RESUMEN

A través de simulaciones numéricas CFD, el presente proyecto aborda la caracterización de la transferencia de calor entre la emulsión gas-partículas y la pared de un lecho fluidizado con aire en régimen total o parcialmente burbujeante. También se estudia el efecto que tiene sobre el coeficiente de transferencia de calor la inclusión de la compresibilidad del aire y la interacción térmica gas-partícula en la simulación. Para ello se realizan simulaciones numéricas del lecho fluidizado en una columna bidimensional, usando un modelo de dos fluidos Euleriano-Euleriano. En la resolución de las ecuaciones del modelo, se recurre al software comercial ANSYS Fluent. El proyecto lleva a cabo distintos bloques de simulaciones en las que se obtiene la transferencia de calor instantánea y media sobre la pared del lecho, así como su relación con la dinámica generada por el paso de burbujas cerca de la pared. Además los resultados obtenidos se comparan con los reportados en literatura especializada. Los resultados del proyecto muestran que el uso de la compresibilidad del gas incrementa el coeficiente de transferencia de calor resultante hasta en un 12% en los casos estudiados. El campo de burbujas cercano a la pared es el efecto dinámico determinante en la transferencia de calor, siendo menos relevante la influencia de las burbujas lejos de la pared. Los resultados del proyecto también indican que la transferencia de calor partícula-pared contribuye en un 90% al coeficiente de transferencia de calor, mientras que la transferencia de calor gas-pared solo participa en el restante 10%.



## ABSTRACT

Through CFD numerical simulations, the present bachelor thesis focuses on the characterization of heat transfer between the gas-particle emulsion and the wall of an air fluidized bed in complete or partial bubbling regime. The effects of the air compressibility and the gas-particle thermal interaction on the coefficient of heat transfer obtained in the simulation are also discussed. These numerical simulations of the fluidized bed are conducted in a two-dimensional column, using an Eulerian-Eulerian two fluid model. To solve the model equations, the commercial software ANSYS Fluent is used. The thesis carries out several simulations in which it is obtained the average and the instantaneous wall-to-bed heat transfer and its relationship to the dynamics generated by the passage of bubbles near the wall. The results obtained are compared with those reported in literature. The obtained results show that the use of gas compressibility increases the resulting heat transfer coefficient up to 12% in the cases studied. The bubble field close to the wall is the determinant effect on heat transfer, with less influence of the bubbles far from the wall. The results also indicate that heat transfer between wall and particles contributes to 90% to the coefficient of heat transfer, whereas heat transfer between the wall and gas only accounts for the remaining 10%.



## ÍNDICE GENERAL

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción y motivación del proyecto	1
1.1.1. Importancia de los lechos fluidizados en la industria	1
1.1.2. El estudio de los lechos fluidizados	1
1.1.3. Simulación de la hidrodinámica y transferencia de calor en lechos fluidizados	2
1.2. Objetivos del proyecto	3
1.3. Metodología empleada para la consecución de los objetivos del proyecto	3
1.4. Fuentes bibliográficas consultadas	4
2. INTRODUCCIÓN A LOS LECHOS FLUIDIZADOS	5
2.1. Fluidización	5
2.2. Regímenes de fluidización	5
2.2.1. Lecho fijo	5
2.2.2. Lecho en mínima fluidización	5
2.2.3. Lecho burbujeante	6
2.2.4. Slugging	6
2.2.5. Fluidización turbulenta	6
2.2.6. Fluidización rápida	6
2.3. Comportamiento líquido de un lecho fluidizado	8
2.4. Ventajas y desventajas de los lechos fluidizados	9
2.5. Factores influyentes en la fluidización	10
2.6. Antecedentes y aplicaciones industriales	11
2.6.1. Operaciones físicas	11
2.6.1.1. Intercambio de calor	11
2.6.1.2. Recubrimiento de objetos metálicos	12
2.6.1.3. Secado de sólidos	12
2.6.1.4. Adsorción	14
2.6.2. Reacciones de síntesis	14
2.6.3. Craqueo de hidrocarburos	15
2.6.3.1. Craqueo catalítico fluido (FCC)	15
2.6.3.2. Craqueo térmico	16
2.6.4. Combustión e incineración	17
2.6.4.1. Combustión de carbón	17
2.6.4.2. Incineración de residuos sólidos	18
2.6.5. Gasificación	19
2.6.5.1. Gasificación de carbón	20
2.6.5.2. Gasificación de residuos sólidos	20
2.6.5.3. Activación del carbón	21
2.6.6. Calcinación	22
2.6.7. Reacciones con sólidos	23
2.6.8. Biofluidización	24
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA FLUIDIZACIÓN	25
3.1. Propiedades de las partículas	25
3.2. Pérdida de carga	26
3.3. Velocidad de mínima fluidización	26
3.4. Diagrama Pérdida de Carga – Velocidad	28
3.5. Efecto de la presión y de la temperatura	29
3.6. Burbujas en lechos fluidos	30
3.6.1. Formación y crecimiento de las burbujas	30
3.6.2. Parámetros de las burbujas	31



3.6.3. Modelo de Davidson	32
3.7. Caracterización de partículas	34
3.8. Distribuidor y Plénum	35
3.8.1. Plénum	36
3.8.2. Distribuidor	36
3.8.2.1. Diseño del distribuidor	37
3.9. Transferencia de calor	38
4. SIMULACIÓN DE LECHOS FLUIDIZADOS MEDIANTE TÉCNICAS CFD	40
4.1. Ecuaciones del modelo computacional Euleriano-Euleriano	41
4.1.1. Ecuaciones de conservación de masa	41
4.1.2. Ecuación de conservación del momento en la fase gas	41
4.1.2.1. Coeficientes de intercambio de momento	41
4.1.3. Ecuación de conservación del momento en la fase sólida	42
4.1.3.1. Ecuaciones constitutivas	42
4.1.4. Balances de energía térmica	44
4.1.5. Fluctuación energética de conservación de las partículas sólidas	44
4.1.6. Coeficiente de transferencia de calor en la interacción gas-sólidos	45
4.1.7. Ecuación gases ideales	45
5. MODELOS COMPUTACIONALES UTILIZADOS EN EL PROYECTO	46
5.1. Desarrollo y comparación con un lecho fluidizado ya estudiado	46
5.1.1. Modelo físico y dominio computacional	46
5.1.2. Mallado del dominio computacional	48
5.1.3. Descripción de los casos	49
5.2. Incorporación de la compresibilidad del gas	49
5.2.1. Modelo físico y dominio computacional	49
5.2.2. Mallado del domino computacional	51
5.2.3. Descripción de los casos	51
5.3. Incorporación de la transferencia de calor al lecho	51
5.3.1. Modelo físico y dominio computacional	52
5.3.2. Mallado del dominio computacional	53
5.3.3. Descripción de los casos	53
5.4. Lecho burbujeante con transferencia de calor	54
5.4.1. Modelo físico y dominio computacional	54
5.4.2. Mallado del dominio computacional	54
5.4.3. Descripción de los casos	55
5.5. Resumen de los casos	55
6. RESULTADOS	56
6.1. Desarrollo y comparación de un estudio computacional sobre un lecho fluidizado	56
6.1.1. Mapas de fracción volumétrica de la fase sólida	57
6.1.2. Grado de expansión del lecho fluidizado	59
6.1.3. Caída de presión en el lecho	62
6.1.4. Aparición de burbujas de aire	63
6.1.5. Velocidad de las partículas sólidas	65
6.1.6. Tránsito de burbujas de aire sobre un punto de control	66
6.2. Incorporación de la compresibilidad del gas	68
6.2.1. Mapas de fracción volumétrica de la fase sólida	68
6.2.2. Grado de expansión del lecho fluidizado	71
6.2.3. Aparición de burbujas de aire	72
6.2.4. Caída de presión en el lecho	75
6.2.5. Perfiles de velocidades	76
6.2.5.1. Velocidad del aire	76
6.2.5.2. Velocidad horizontal de los sólidos	77
6.2.5.3. Velocidad vertical de los sólidos	77





6.2.6. Mapas de densidad	78
6.2.7. Tránsito de burbujas de aire sobre un punto de control	80
6.3. Incorporación de la transferencia de calor al lecho	81
6.3.1. Mapas de fracción volumétrica de la fase sólida	81
6.3.2. Grado de expansión del lecho fluidizado	85
6.3.3. Aparición de burbujas de aire	86
6.3.4. Caída de presión en el lecho	90
6.3.5. Perfiles de velocidades	90
6.3.5.1. Velocidad del aire	90
6.3.5.2. Velocidad horizontal de los sólidos	91
6.3.5.3. Velocidad vertical de los sólidos	92
6.3.6. Mapas de densidad	92
6.3.7. Transferencia de calor a lo largo del tiempo	95
6.3.8. Perfiles del coeficiente de transferencia de calor	96
6.3.9. Perfiles de temperatura	98
6.3.9.1. Temperatura del aire	98
6.3.9.2. Temperatura de las partículas sólidas	99
6.3.10. Tránsito de burbujas de aire sobre un punto de control	99
6.4. Lecho burbujeante con transferencia de calor	100
6.4.1. Mapas de fracción volumétrica de la fase sólida	100
6.4.2. Grado de expansión del lecho fluidizado	103
6.4.3. Aparición de burbujas de aire	105
6.4.4. Caída de presión en el lecho	108
6.4.5. Perfiles de velocidades	109
6.4.5.1. Velocidad del aire	109
6.4.5.2. Velocidad horizontal de los sólidos	110
6.4.5.3. Velocidad vertical de los sólidos	110
6.4.6. Mapas de densidad	111
6.4.7. Transferencia de calor a lo largo del tiempo	113
6.4.8. Perfiles del coeficiente de transferencia de calor	114
6.4.9. Perfiles de temperatura	116
6.4.9.1. Temperatura del aire	116
6.4.9.2. Temperatura de las partículas sólidas	117
6.4.10. Tránsito de burbujas de aire sobre un punto de control	117
7. CONCLUSIONES	119
7.1. Resumen de tareas realizadas	119
7.2. Principales resultados	119
7.2.1. Desarrollo y comparación de un estudio computacional sobre un lecho fluidizado	119
7.2.2. Incorporación de la compresibilidad del gas	121
7.2.3. Incorporación de la transferencia de calor	124
7.2.4. Lecho burbujeante con transferencia de calor	128
7.3. Conclusiones finales	134
7.4. Estimación del coste del proyecto	135
7.5. Críticas a los resultados	135
7.6. Líneas futuras de investigación	136
8. REFERENCIAS	137



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Regímenes de fluidización	7
Figura 2. Relación de regímenes de fluidización con la velocidad del fluido	8
Figura 3. Comportamiento líquido de un lecho de partículas	9
Figura 4. Ejemplos de intercambiadores de calor mediante lecho fluidizado	12
Figura 5. Fluidización en procesos de secados de sólidos	13
Figura 6. Sistemas de craqueo catalítico fluido	16
Figura 7. Proceso de fluidización en craqueo térmico	17
Figura 8. Combustión de carbón en lecho fluidizado burbujeante	18
Figura 9. Ejemplo de diseño de incineración de sólidos en lecho fluidizado	19
Figura 10. Gasificación de carbón en lecho fluidizado	20
Figura 11. Gasificación de residuos sólidos en lecho fluidizado	21
Figura 12. Activación de carbón en lecho fluidizado	22
Figura 13. Calcinación de caliza en lecho fluidizado	23
Figura 14. Biofluidización, producción de salsa de soja en lecho fluidizado	24
Figura 15. Curva Pérdida de carga vs Velocidad del Gas	29
Figura 16. Comparación de la distribución de presión alrededor de una burbuja entre el modelo de Davidson y los datos experimentales de Reuter	32
Figura 17. Representación de la distribución de la presión alrededor de una burbuja con el modelo de Davidson	33
Figura 18. Clasificación de las partículas de Geldart	35
Figura 19. Modelos simples de plenum	36
Figura 20. Plato distribuidor	37
Figura 21. Caída de presión en el distribuidor en función de la velocidad de fluidización	38
Figura 22. Esquema de la instalación seguida para la comparación del estudio computacional de un lecho fluidizado	47
Figura 23. Malla computacional utilizada para el estudio del lecho fluidizado	48
Figura 24. Detalle de las celdas de la malla computacional	48
Figura 25. Esquema de la instalación utilizada en la simulación computacional de los Casos 5 y 6	50
Figura 26. Malla computacional utilizada para el estudio del lecho fluidizado, Casos 6 y 7	51
Figura 27. Esquema de la instalación utilizada en la simulación computacional de los Casos 8, 9 y 10	52
Figura 28. Malla computacional utilizada para el estudio del lecho fluidizado, Casos 8, 9 y 10	53
Figura 29. Detalle de las celdas de la malla computacional	53
Figura 30. Mapas de fracción volumétrica obtenidos por la U.B.C. (Modelo: Syamlal-O'Brien; $U=0,38\text{m/s}$ )	57
Figura 31. Mapas de fracción volumétrica del Caso 1 (Modelo: Syamlal-O'Brien; $U=0,38\text{m/s}$ ; Paso de tiempo= $0,001\text{s}$ )	58
Figura 32. Mapas de fracción volumétrica del Caso 2 (Modelo: Gidaspow; $U=0,38\text{m/s}$ ; Paso de tiempo= $0,001\text{s}$ )	58
Figura 33. Mapas de fracción volumétrica del Caso 3 (Modelo: Syamlal-O'Brien; $U=0,38\text{m/s}$ ; Paso de tiempo= $0,0005\text{s}$ )	59
Figura 34. Comparación realizada por U.B.C. del grado de expansión del lecho fluido según la velocidad de inyección de gas para distintos modelos de cálculo con respecto al experimento	60
Figura 35. Fracción volumétrica de fase sólida (Caso 1; Formulación: Syamlal-O'Brien; $U=0,38$ )	60
Figura 36. Grado de expansión del lecho (Criterio del 50%)	61
Figura 37. Grado de expansión del lecho (Criterio del 90%)	61
Figura 38. Comparación realizada por la U.B.C. de la caída de presión en el lecho para los modelos de Syamlal y Gidaspow (Velocidad del aire = $0,38\text{ m/s}$ )	62
Figura 39. Comparación de la caída de presión en el lecho entre los modelos de Syamlal-O'Brien (Caso 1) y Gidaspow (Caso 2), $U=0,38\text{m/s}$	62
Figura 40. Valores medios de la fracción volumétrica de aire obtenida por la U.B.C. (A) $z=0,2\text{m}$ ; $U=0,38\text{m/s}$ , (B) $z=0,2\text{m}$ ; $U=0,46\text{m/s}$	63
Figura 41. Valores medios de la fracción volumétrica de aire, Caso 1, $z=0,2\text{ m}$ , $U=0,38$	64



m/s	
Figura 42. Valores medios de la fracción volumétrica de aire, Caso 4, $z=0,2$ m, $U=0,46$ m/s	64
Figura 43. Velocidad vertical de las partículas sólidas frente a la teórica, $z=0,2$ m, $U=0,46$ m/s	65
Figura 44. Velocidad vertical de las partículas sólidas Caso 1 ( $U=0,38$ m/s) y Caso 4 ( $U=0,46$ m/s)	66
Figura 45. Tránsito de burbujas de aire en el caso experimental de la U.B.C	66
Figura 46. Tránsito de burbujas de aire en el caso simulado de la U.B.C	67
Figura 47. Tránsito de burbujas de aire en un punto de control, Caso 4 ( $U=0,46$ m/s, $z=0,2$ m)	67
Figura 48. Mapas de fracción volumétrica en el inicio de la fluidización, Caso 6 (aire incompresible, $U=0,5$ m/s)	69
Figura 49. Mapas de fracción volumétrica en el inicio de la fluidización, Caso 7 (aire compresible, $U=0,5$ m/s)	69
Figura 50. Fracción volumétrica de sólidos con el lecho fluidizado, Caso 6 (aire incompresible, $U=0,5$ m/s)	70
Figura 51. Fracción volumétrica de sólidos con el lecho fluidizado, Caso 7 (aire compresible, $U=0,5$ m/s)	70
Figura 52. Fracción volumétrica en función de la distancia a la base del lecho, Caso 6 (aire incompresible, $U=0,5$ m/s)	71
Figura 53. Fracción volumétrica en función de la distancia a la base del lecho, Caso 7 (aire compresible, $U=0,5$ m/s)	71
Figura 54. Fracción volumétrica de aire, $z=0,01$ m	72
Figura 55. Fracción volumétrica de aire, $z=0,02$ m	73
Figura 56. Fracción volumétrica de aire, $z=0,05$ m	73
Figura 57. Fracción volumétrica de aire, $z=0,1$ m	74
Figura 58. Fracción volumétrica de aire, $z=0,15$ m	74
Figura 59. Fracción volumétrica de aire, $z=0,2$ m	75
Figura 60. Caída de presión en la columna del lecho	75
Figura 61. Velocidad vertical del aire, $z=0,2$ m	76
Figura 62. Velocidad horizontal de las partículas sólidas, $z=0,2$ m	77
Figura 63. Velocidad vertical de las partículas sólidas, $z=0,2$ m	78
Figura 64. Mapas de densidad del aire en el lecho fluidizado	79
Figura 65. Densidad media del aire a lo largo del lecho fluidizado	80
Figura 66. Tránsito de burbujas de aire en un punto de control, Caso 6 y Caso 7	80
Figura 67. Mapas de fracción volumétrica de sólidos en el Caso 8	82
Figura 68. Mapas de fracción volumétrica de sólidos en el Caso 9	83
Figura 69. Mapas de fracción volumétrica de sólidos en el Caso 10	84
Figura 70. Fracción volumétrica en función de la distancia a la base del lecho, Caso 8	85
Figura 71. Fracción volumétrica en función de la distancia a la base del lecho, Caso 9	85
Figura 72. Fracción volumétrica en función de la distancia a la base del lecho, Caso 10	86
Figura 73. Fracción volumétrica de aire, $z=0,01$ m	87
Figura 74. Fracción volumétrica de aire, $z=0,02$ m	87
Figura 75. Fracción volumétrica de aire, $z=0,05$ m	88
Figura 76. Fracción volumétrica de aire, $z=0,10$ m	88
Figura 77. Fracción volumétrica de aire, $z=0,15$ m	89
Figura 78. Fracción volumétrica de aire, $z=0,20$ m	89
Figura 79. Caída de presión en la columna del lecho	90
Figura 80. Velocidad vertical del aire, $z=0,2$ m	91
Figura 81. Velocidad horizontal de las partículas sólidas, $z=0,2$ m	91
Figura 82. Velocidad vertical de las partículas sólidas, $z=0,2$ m	92
Figura 83. Mapas de densidad del aire, Caso 9	93
Figura 84. Mapas de densidad del aire, Caso 10	94
Figura 85. Densidad media del aire a lo largo del lecho fluidizado	95
Figura 86. Coeficiente de transferencia de calor en función del tiempo	95
Figura 87. Perfil del coeficiente de transferencia de calor de la pared al lecho, Caso 8	96
Figura 88. Perfil del coeficiente de transferencia de calor de la pared al lecho, Caso 9	96
Figura 89. Perfil del coeficiente de transferencia de calor de la pared al lecho, Caso 10	97
Figura 90. Coeficiente de transferencia de calor medio a lo largo de la pared	97
Figura 91. Perfiles de temperatura media del aire, $z=0,2$ m	98



Figura 92. Perfiles de temperatura media de las partículas sólidas, $z=0,2$ m	99
Figura 93. Tránsito de burbujas de aire en un punto de control, Caso 3 y Caso 4	99
Figura 94. Mapas de fracción volumétrica de sólidos en el Caso 11	101
Figura 95. Mapas de fracción volumétrica de sólidos en el Caso 12	102
Figura 96. Mapas de fracción volumétrica de sólidos en el Caso 13	103
Figura 97. Fracción volumétrica en función de la distancia a la base del lecho, Caso 11	104
Figura 98. Fracción volumétrica en función de la distancia a la base del lecho, Caso 12	104
Figura 99. Fracción volumétrica en función de la distancia a la base del lecho, Caso 13	104
Figura 100. Fracción volumétrica de aire, $z=0,01$ m	105
Figura 101. Fracción volumétrica de aire, $z=0,02$ m	106
Figura 102. Fracción volumétrica de aire, $z=0,05$ m	106
Figura 103. Fracción volumétrica de aire, $z=0,10$ m	107
Figura 104. Fracción volumétrica de aire, $z=0,15$ m	107
Figura 105. Fracción volumétrica de aire, $z=0,20$ m	108
Figura 106. Caída de presión en la columna del lecho	108
Figura 107. Velocidad vertical del aire, $z=0,2$ m	109
Figura 108. Velocidad horizontal de las partículas sólidas, $z=0,2$ m	110
Figura 109. Velocidad vertical de las partículas sólidas, $z=0,2$ m	110
Figura 110. Mapas de densidad del aire, Caso 12	111
Figura 111. Mapas de densidad del aire, Caso 13	112
Figura 112. Densidad media del aire a lo largo del lecho fluidizado	113
Figura 113. Coeficiente de transferencia de calor en función del tiempo	113
Figura 114. Perfil del coeficiente de transferencia de calor de la pared al lecho, Caso 11	114
Figura 115. Perfil del coeficiente de transferencia de calor de la pared al lecho, Caso 12	114
Figura 116. Perfil del coeficiente de transferencia de calor de la pared al lecho, Caso 13	115
Figura 117. Media temporal del coeficiente de transferencia de calor a lo largo de la pared	115
Figura 118. Perfiles de temperatura media del aire, $z=0,2$ m.	116
Figura 119. Perfiles de temperatura de las partículas sólidas, $z=0,2$ m	117
Figura 120. Tránsito de burbujas de aire en un punto de control, Caso 10 y Caso 11	118
Figura 121. Mapas de fracción volumétrica de sólidos ( $t=3$ s)	120
Figura 122. Grado de expansión del lecho en función de la velocidad del aire	120
Figura 123. Velocidad de las partículas sólidas a 20 cm del fondo del lecho	121
Figura 124. Mapas de fracción volumétrica de las partículas sólidas de ambos casos en $t=3$ s y $t=7$ s	121
Figura 125. Fracción volumétrica de aire, $z=0,2$ m	122
Figura 126. Velocidad vertical del aire, $z=0,2$ m	123
Figura 127. Velocidad vertical de las partículas sólidas, $z=0,2$ m	123
Figura 128. Densidad media del aire a lo largo del lecho fluidizado	124
Figura 129. Mapas de fracción volumétrica de sólidos, $t=0.75$ s y $t=1.5$ s	125
Figura 130. Fracción volumétrica de aire, $z=0,2$ m	125
Figura 131. Velocidad vertical del aire, $z=0,2$ m	126
Figura 132. Velocidad vertical de las partículas sólidas, $z=0,2$ m	126
Figura 133. Densidad media del aire a lo largo del lecho fluidizado	127
Figura 134. Coeficiente de transferencia de calor en función del tiempo	127
Figura 135. Media temporal del coeficiente de transferencia de calor a lo largo de la pared	128
Figura 136. Mapa de fracción volumétrica de sólidos, $t=1.75$ s y $t=3.0$ s	129
Figura 137. Fracción volumétrica de aire, $z=0,2$ m	130
Figura 138. Velocidad vertical del aire, $z=0,2$ m	130
Figura 139. Velocidad vertical de las partículas sólidas, $z=0,2$ m	131
Figura 140. Densidad media del aire a lo largo del lecho fluidizado	131
Figura 141. Coeficiente de transferencia de calor en función del tiempo	132
Figura 142. Coeficiente de transferencia de calor medio a lo largo de la pared	132



## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Valores de los parámetros $K_1$ y $K_2$	28
Tabla 2. Resumen del dominio computacional del Bloque 1	47
Tabla 3. Resumen del dominio computacional del Bloque 2	50
Tabla 4. Resumen del dominio computacional del Bloque 3	52
Tabla 5. Resumen del dominio computacional del Bloque 4	54
Tabla 6. Resumen de los casos estudiados	55
Tabla 7. Resumen de los casos del Bloque 1	56
Tabla 8. Resumen de los casos del Bloque 2	68
Tabla 9. Grado de expansión en el Bloque 2	72
Tabla 10. Resumen de los casos del Bloque 3	81
Tabla 11. Grado de expansión	86
Tabla 12. Media espacial del coeficiente de transferencia de calor	98
Tabla 13. Resumen de los casos del Bloque 4	100
Tabla 14. Grado de expansión	105
Tabla 15. Media espacial del coeficiente de transferencia de calor	116
Tabla 16. Media espacial del coeficiente de transferencia de calor	128
Tabla 17. Media espacial del coeficiente de transferencia de calor	133
Tabla 18. Coste de realización del proyecto	135



## NOMENCLATURA

$A_0$	Área del distribuidor por orificio (m <sup>2</sup> )	$\alpha$	Coefficiente volumétrico de transferencia de calor de la interfase (J/m <sup>3</sup> K)
$Ar$	Número de Arquímedes	$\alpha_s$	Coefficiente de transferencia de calor gas-partícula (J/m <sup>2</sup> K)
$A_t$	Sección transversal del lecho (m <sup>2</sup> )	$\gamma_{\theta m}$	Energía de disipación por colisiones (kg/s <sup>3</sup> m)
$c_D$	Coefficiente de fricción	$\varepsilon$	Fracción de vacío en el lecho
$d_{b0}$	Diámetro de una burbuja a la salida del distribuidor (m)	$\eta$	Viscosidad dinámica (kg/s m)
$d_b$	Diámetro de una burbuja (m)	$\theta_s$	Temperatura granular (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
$d_p$	Diámetro de las partículas (m)	$\lambda_s$	Viscosidad volumétrica (kg/s m)
$e_{ss}$	Coefficiente de restitución	$\mu$	Viscosidad (kg/s m)
$g$	Aceleración de la gravedad (m/s <sup>2</sup> )	$\nu$	Viscosidad cinemática (m <sup>2</sup> /s)
$g_{0,ss}$	Función de distribución radial	$\rho$	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
$H$	Altura del lecho (m)	$\rho_b$	Densidad del lecho (kg/m <sup>3</sup> )
$h$	Coefficiente de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> K)	$\bar{\tau}$	Tensor de tensiones (Pa)
$\bar{I}$	Tensor de inercia	$\emptyset$	Esfericidad
$I_{2D}$	Segundo invariante del tensor de inercia		
$K_{gs}$	Coefficiente de distribución de fuerzas		
$k$	Conductividad térmica (J/K s m)		
$k_{\theta s}$	Coefficiente de difusión de temperatura granular (kg/s m)		
$l_{or}$	Distancia entre centros de los orificios del distribuidor (m)		
$M$	Masa molar (kg/mol)		
$m_b$	Masa total de las partículas contenidas en el lecho (kg)		
$m_p$	Masa de una partícula (kg)		
$Nr$	Número de orificios del distribuidor		
$Nu$	Número de Nusselt		
$p$	Presión (Pa)		
$\Delta p$	Pérdida de carga (Pa)		
$\Delta p_{dis}$	Caída de presión en el distribuidor (Pa)		
$Pr$	Número de Prandtl		
$R$	Constante universal de los gases ideales (J/mol·K)		
$R_n$	Radio de curvatura de una burbuja		
$Re$	Número de Reynolds		
$T$	Temperatura (K)		
$T_{bed}$	Temperatura del lecho (K)		
$T_w$	Temperatura de la pared (K)		
$u$	Velocidad del flujo (m/s)		
$u_{br}$	Velocidad de ascenso de una burbuja (m/s)		
$V_{ap}$	Volumen aparente de un lecho de partículas (m <sup>3</sup> )		
$V_h$	Volumen hidrodinámico de una partícula (m <sup>3</sup> )		
$z$	Distancia desde el distribuidor al punto de medida (m)		

### Subíndices

$g$	Gas
$s$	Partículas sólidas
$mf$	Mínima fluidización
$0$	Estado inicial o de reposo



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Introducción y motivación del proyecto

### 1.1.1. Importancia de los lechos fluidizados en la industria

Un lecho fluido es una emulsión de sólidos dentro de una corriente fluida. El conjunto sólido-fluido se comporta macroscópicamente como un fluido líquido.

Los lechos fluidizados del tipo gas-sólido son en la actualidad de alta importancia en la industria, pues se emplean en gran número de operaciones de diversa índole, como por ejemplo en plantas químicas y farmacéuticas, en operaciones de secado y granulado, o en la producción de energía. Muchas de estas operaciones, no solo tienen importancia a nivel mundial, como el craqueo catalítico del petróleo (Kunii y Levenspiel, 1991), sino también a nivel nacional. Un ejemplo de esto puede ser la Fundación Ciudad de la Energía, que utiliza los lechos fluidizados para la captura de  $\text{CO}_2$  en un proceso de oxidación, proceso pionero mundial (Ciuden, 2014). La mayor parte de estos procesos industriales con lechos fluidizados comprenden operaciones no isotermas en las que aparecen fenómenos de transferencia de calor y cambio de densidad de la fase gas. Estos efectos están insuficientemente comprendidos pues son de gran complejidad. Para la mejora de estos procesos industriales, es necesario el estudio de la dinámica y la transferencia de calor en lechos fluidizados.

### 1.1.2. El estudio de los lechos fluidizados

Existen dos tipos de estudios con lechos fluidizados: experimentales y numéricos. En estos estudios el objetivo último es buscar un incremento de la eficiencia en los procesos en los que se emplean lechos fluidizados. También se persigue un mejor conocimiento de la física del lecho para ampliar su uso futuro. A pesar de su aplicación generalizada, gran parte del desarrollo y del diseño de los reactores empleados ha sido empírico. Esto es así ya que para realizar una correcta modelización del sistema, ha de reproducirse el complejo comportamiento del conjunto gas-sólido. El principal problema reside a la hora de realizar la modelización hidrodinámica y térmica del lecho fluidizado, pues las interacciones entre el gas y la fase densa son transitorias y caóticas. Solo para un rango muy limitado de condiciones se conocen los fenómenos de interacción entre fases. Una opción para resolver directamente la mezcla entre fases, sería tratar a cada fase mediante la mecánica de medios continuos estándar incluyendo los límites y condiciones de salto necesarias para resolver las ecuaciones que rigen el comportamiento de la interfase gas-sólido. Debido a la complejidad matemática de las ecuaciones no lineales y también a las condiciones de movimiento de la interfase, la resolución numérica de dichas ecuaciones es muy compleja de obtener. Por ello, en la actualidad son más comunes otras aproximaciones al problema que serán descritas en el apartado siguiente.

Con el desarrollo de las capacidades de computación de las últimas décadas, la dinámica de fluidos computacional, CFD (Computational Fluid Dynamics), ha cobrado gran importancia para la realización de las modelizaciones hidrodinámicas y térmicas de procesos en la industria. Para la mayor parte de los flujos de fase única, la simulación CFD cada vez más puede usarse como una herramienta estándar. Es en el desarrollo de flujos con varias fases, como lechos fluidizados, donde residen actualmente los mayores retos en la utilización de herramientas computacionales.

#### 1.1.3. Simulación de la hidrodinámica y transferencia de calor en lechos fluidizados

Existen dos enfoques diferentes desde los que se parte para aplicar modelos CFD en sistemas gas-sólido en lechos fluidizados: un método discreto basado en la dinámica de partículas acopladas a una fase continua (modelo Lagrangiano-Euleriano); y otro método basado en la mecánica de medios continuos, en el que se trata a las dos fases como fluidos interpenetrantes (modelo Euleriano-Euleriano). El modelo Lagrangiano-Euleriano para sistemas fluidos de dos fases es capaz de resolver directamente los efectos de las colisiones entre partículas. El requerimiento computacional necesario para ello es muy elevado. Esto provoca que para sistemas con un alto número de partículas el modelo Lagrangiano-Euleriano sea descartado, dejando el modelo Euleriano-Euleriano como el más utilizado para simulaciones a nivel macroscópico en lechos de mediano y gran tamaño.

Las aplicaciones CFD para el modelado de lechos fluidizados, presentan numerosas ventajas para la predicción del comportamiento de lechos. Por esto, son de gran ayuda para las aplicaciones industriales en mejoras de diseño, de dimensionado o de optimización de los sistemas. Sin embargo, muchos modelos de cierre de las ecuaciones usadas en la simulación quedan resueltos por correlaciones de carácter semiempírico. Como parte de este hecho, el modelo, incluyendo los parámetros utilizados, debe ser validado con resultados obtenidos experimentalmente en diseños con configuraciones similares a las simuladas. Los estudios experimentales de lechos fluidizados suelen emplear una morfología pseudo bidimensional obtenida con lechos delgados en vasijas prismáticas. Esto se utiliza para poder tener una mejor visualización de las características del lecho durante la fluidización, así como para poder estudiar el comportamiento de las burbujas y sus propiedades. Esta morfología es reproducida en las simulaciones numéricas mediante la resolución de las ecuaciones en dominios bidimensionales. Dicha simplificación del dominio ayuda a reducir el coste computacional, permitiendo abordar estudios más complejos de simulación.

A pesar de toda la literatura abierta consultada sobre lechos fluidizados, se han encontrado muy pocos casos en los que se tenga en cuenta en las simulaciones la compresibilidad del gas. En la mayoría de los estudios de lechos fluidizados con sistemas gas-sólido, el gas es tratado como un gas incompresible en el que la densidad es constante. En los estudios de transferencia de calor consultados en la bibliografía, no se tiene en cuenta la variación de densidad del gas. Debido a esto, se hace interesante el



estudio de la influencia que tiene la compresibilidad del gas sobre la dinámica del lecho, así como sobre la transferencia de calor y sus coeficientes involucrados.

Al tener en cuenta la compresibilidad del gas, se están simulando condiciones más reales. Por consiguiente, en principio este tipo de simulaciones se acercarán más a los lechos fluidizados utilizados en los procesos industriales no isotermos. Por este motivo, es de gran importancia los estudios con gas compresible puesto que, mediante el análisis de sus características, se puede llegar a una mayor optimización de los procesos.

### 1.2. Objetivos del proyecto

Atendiendo a la motivación presentada en el apartado anterior, los objetivos buscados en el presente proyecto son los siguientes:

- Simulación CFD de lechos fluidizados no isotermos mediante la incorporación del efecto de una pared a mayor temperatura que el gas de fluidización.
- Inclusión del efecto de la compresibilidad del gas en el estudio de lechos fluidizados.
- Caracterización de la hidrodinámica básica y la transferencia de calor entre la emulsión y la pared del lecho.
- Comprobación de la influencia del diseño, de las condiciones de contorno, y de la compresibilidad del gas en la hidrodinámica y transferencia de calor de los lechos simulados.
- Validación práctica de los resultados obtenidos en las simulaciones mediante la comparación con los resultados experimentales y de simulación presentes en la literatura especializada.
- Contribución al entendimiento de la física de lechos fluidizados no isotermos y con fase gaseosa.

### 1.3. Metodología empleada para la consecución de los objetivos del proyecto

El proyecto fin de carrera se ha realizado en el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid.

Para llevar a cabo las simulaciones CFD de los lechos fluidizados, se ha empleado el software comercial ANSYS Fluent v14, disponible en las aulas informáticas de la citada Universidad. En primer lugar se realizó una familiarización con este tipo de software. Para ello, se reprodujeron varios casos sencillos de ejemplos incluidos en la ayuda tutorial de ANSYS Fluent proporcionada con el software, cuyos resultados no se han incluido en el proyecto por brevedad. Una vez adquirida suficiente destreza con este tipo de software, se crearon los diferentes modelos de geometría y condiciones operativas que se describen a lo largo del proyecto.

Para el cumplimiento de los objetivos marcados, se ha estructurado el proyecto de la siguiente manera:



1. Documentación y búsqueda bibliográfica sobre el campo de los lechos fluidizados.
2. Reproducción de ejemplos disponibles en la ayuda tutorial de ANSYS Fluent.
3. Reproducción y comparación del estudio publicado por el investigador Taghipour y colaboradores del Departamento de Ingeniería Química y Biológica de la Universidad de British Columbia. En el citado estudio se realizó una comparación del mismo modelo entre resultados obtenidos mediante simulación CFD y los resultados obtenidos experimentales al diseñar una columna 2D de un lecho fluidizado. En el presente proyecto se reproducirá la simulación de Taghipour y colaboradores, como primera fase de validación de resultados.
4. Incorporación de la compresibilidad del gas a un lecho fluidizado. Comparación directa con el mismo modelo en el caso con gas incompresible.
5. Reproducción de un caso en el que se estudió la transferencia de calor desde una pared caliente a un lecho fluidizado por una entrada de aire a gran velocidad que forma un burbujeo del lecho pegado a pared (lecho parcialmente burbujeante). Este caso a reproducir fue llevado a cabo por Kuipers y colaboradores en 1992 y más adelante por Patil y sus colaboradores en 2006.
6. Comparación entre la reproducción del estudio realizado en el punto 5 y el mismo caso con gas compresible.
7. Unión de los modelos reproducidos para el estudio de un caso con un lecho completamente burbujeante, con una pared caliente y una comparación entre el modelo con gas compresible y con gas incompresible.
8. Realización del informe del proyecto conteniendo una explicación de la operativa seguida y de los principales resultados encontrados.

#### 1.4. Fuentes bibliográficas consultadas

Para la consecución de este estudio de lechos fluidizados se hizo una búsqueda bibliográfica del tema general de los lechos fluidizados. Esta búsqueda se realizó principalmente en la biblioteca de la Universidad Carlos III de Madrid, debido a que posee una amplia colección de libros de ingeniería en esta temática. Además se efectuó una lectura de literatura especializada (artículos de revistas científicas) en temas más específicos sobre la hidrodinámica y transferencia de calor en lechos fluidizados. Como primera toma de contacto con el campo de los lechos fluidizados se realizó una lectura de *"Fluidization Engineering"* segunda edición, 1991, de Daizo Kunii y Octave Levenspiel, en la que se aprendieron los conocimientos básicos de los lechos fluidizados que se utilizaron para la realización de este proyecto. Para realizar las simulaciones y la correcta utilización de las ecuaciones del software comercial ANSYS Fluent, se consultó la ayuda tutorial propia del software. También se consultaron estudios publicados en los que basarse para llevar a cabo las primeras simulaciones como el realizado por Taghipour y colaboradores (2005) o el publicado por Kuipers y colaboradores (1992).



## 2. INTRODUCCIÓN A LOS LECHOS FLUIDIZADOS

En este apartado, se introducen las características básicas de los lechos fluidizados, así como sus aplicaciones industriales. La información con la que se ha desarrollado este capítulo, se ha obtenido del Kunii y Levenspiel (1991).

### 2.1. Fluidización

La fluidización es la operación, por la cual, partículas sólidas son llevadas a un estado parecido a un fluido, mediante la suspensión de estas partículas en un gas o un líquido. Este método de contacto entre fluido y partículas, tiene unas características poco usuales. Mediante el estudio de estas propiedades, se pueden conocer y desarrollar aplicaciones industriales donde pueda ser útil la fluidización.

### 2.2. Regímenes de fluidización

Dependiendo de las condiciones, aparecerán diferentes modos de funcionamiento, en este caso según la velocidad de entrada del fluido, se diferencian del siguiente modo.

#### 2.2.1. Lecho fijo

Si el gas es conducido desde un distribuidor en la parte inferior, a través de un lecho de finas partículas sólidas, a bajas velocidades, el fluido se filtra por los espacios que dejan las partículas entre ellas. El fluido asciende a tan baja velocidad que no consigue vencer las fuerzas que actúan sobre las partículas (Figura 1.a).

#### 2.2.2. Lecho en mínima fluidización

Al incrementar la velocidad del fluido, llegará un valor en el que esta velocidad conseguirá que las fuerzas de fricción entre las fases, contrarresten el propio peso de las partículas. En este punto la componente vertical de la fuerza de presión entre partículas adyacentes, desaparece. La caída de presión en el lecho, iguala aproximadamente el peso del fluido y de las partículas sólidas en esa sección. Una mínima disminución de la velocidad haría que el lecho dejara de estar fluidizado, ocurriendo que las partículas se encuentren en suspensión sin movimiento aparente. Esta velocidad se denomina *velocidad de mínima fluidización* (Figura 1.b).



### 2.2.3. Lecho burbujeante

Al sobrepasar la velocidad de mínima fluidización, aparecen inestabilidades y se forman grandes burbujas de gas. Con el incremento de caudal, las inestabilidades se vuelven más violentas y se producen movimientos enérgicos de las partículas sólidas. Las burbujas formadas, ascienden a través del lecho y pueden unirse unas con otras para dar burbujas de mayor tamaño. Al llegar las burbujas al límite del lecho, desaparecen, arrojando las partículas que arrastraban en la ascensión. La velocidad a la que se empiezan a observar las primeras burbujas, se llama *velocidad de mínimo burbujeo* (Figura 1.d).

### 2.2.4. Slugging

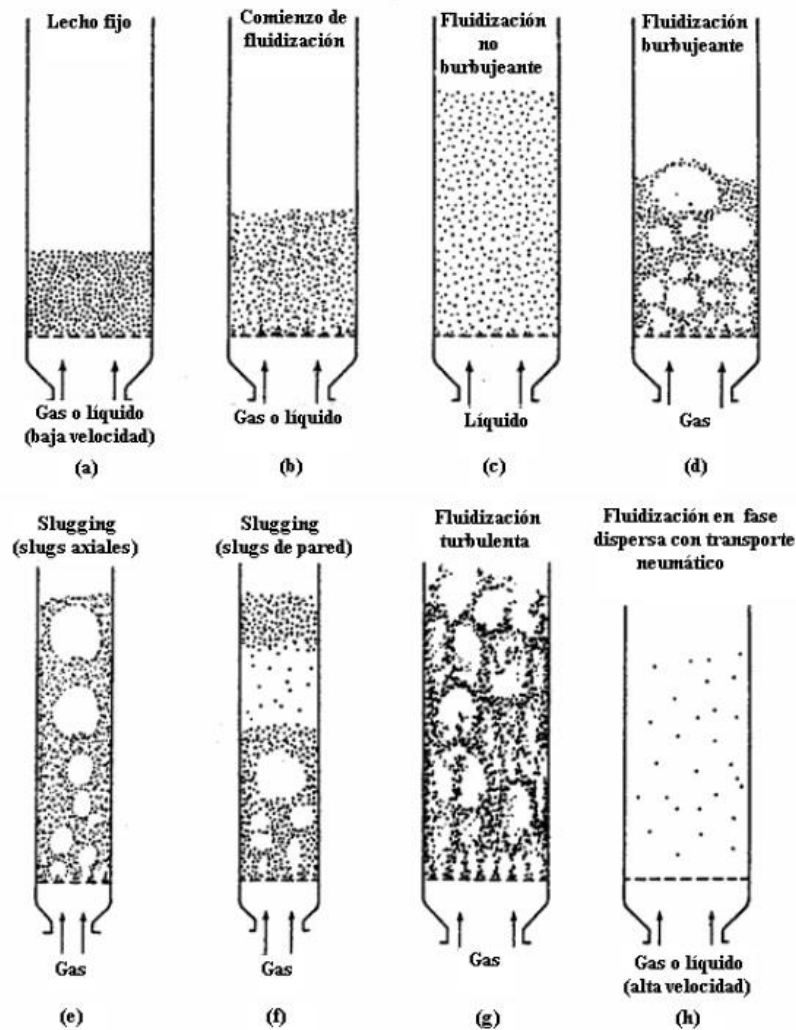
El fenómeno de *slugging* se produce por la coalescencia de las burbujas ascendentes, pudiendo ocupar estas toda la sección del lecho, empujando las partículas hacia arriba como si fuera un pistón (Figura 1.e y 1.f).

### 2.2.5. Fluidización turbulenta

Si se sigue aumentando la velocidad de entrada del gas, las inestabilidades se vuelven muy enérgicas. Esto produce que las burbujas sean de mayor tamaño y que muchas de ellas exploten sin llegar a la superficie superior. En el lecho es más difícil distinguir las zonas ocupadas por burbujas de gas de las que están ocupadas por partículas fluidizadas. La superficie superior del lecho desaparece y pasa a ser una superficie irregular y que cambia con rapidez (Figura 1.g).

### 2.2.6. Fluidización rápida

A mayor velocidad que la fluidización turbulenta, las partículas sólidas son arrastradas por la corriente de aire y transportadas fuera del lecho. Esto puede resultar en un transporte individual o formando un conglomerado de partículas. Debido a esto, se requiere un aporte continuo al lecho para compensar las partículas perdidas. Este caso se trata de una transición entre los regímenes de fluidización y los de transporte neumático (Figura 1.h).



**Figura 1.** Regímenes de fluidización: (a) Lecho fijo; (b) Lecho en mínima fluidización; (c) Lecho fluidizado no burbujeante; (d) Lecho burbujeante; (e) Slugging axial; (f) Slugging de pared; (g) Fluidización turbulenta; (h) Fluidización con transporte de partículas. Fuente: Adaptado de Kunii y Levenspiel (1991).

De forma esquemática, se relacionan los diferentes regímenes de fluidización mediante la velocidad de entrada del fluido, además de los regímenes de transporte de partículas (Figura 2).

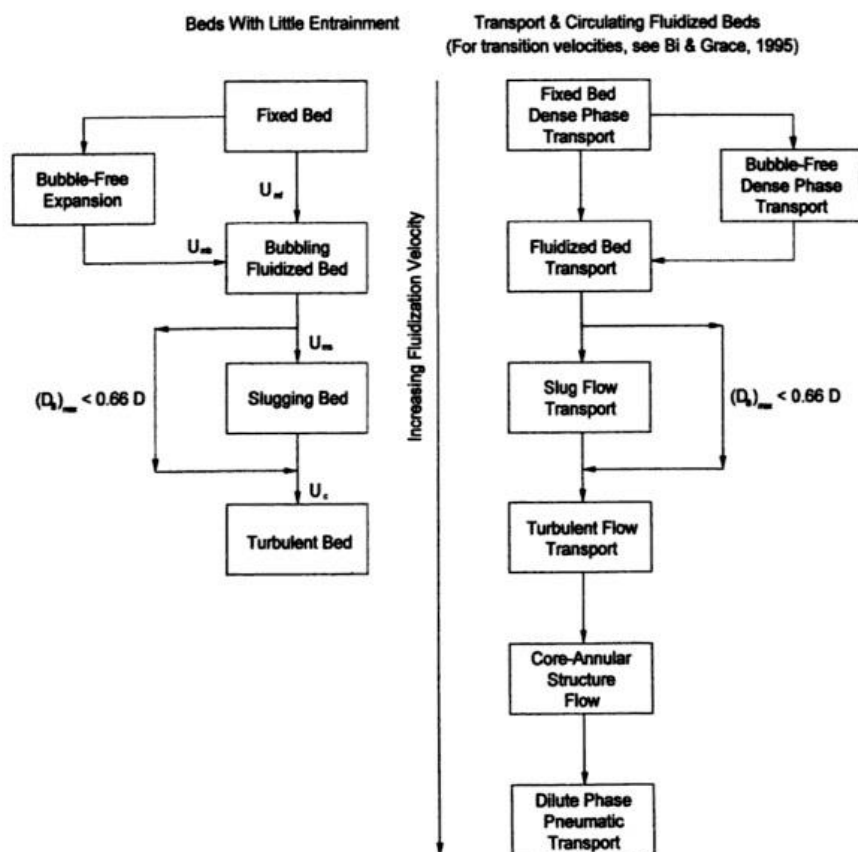
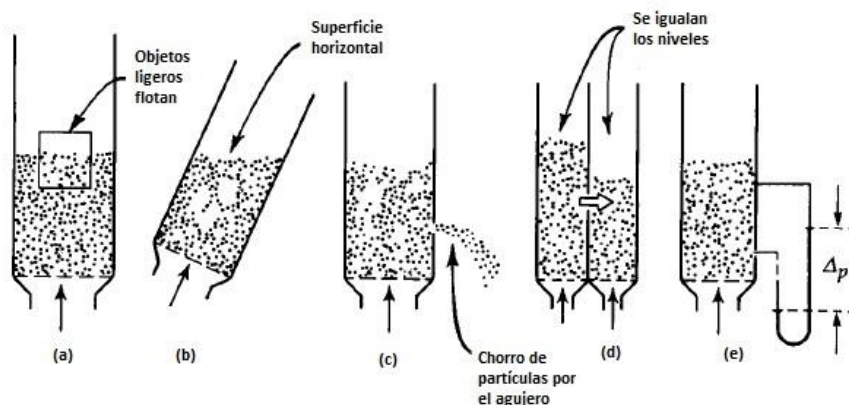


Figura 2. Relación de regímenes de fluidización con la velocidad del fluido. Fuente: Yang (2003).

### 2.3. Comportamiento líquido de un lecho fluidizado

Un lecho fluidizado de fase densa, se parece mucho a un líquido en ebullición y en muchos aspectos, muestra un comportamiento líquido. Un ejemplo de este comportamiento es la flotabilidad de objetos grandes y ligeros en la superficie superior del lecho (Figura 3.a). Cuando dos lechos están conectados sus niveles se igualan (Figura 3.d), o como la superficie del lecho se mantiene horizontal cuando el recipiente está inclinado (Figura 3.b). El lecho también tiene un comportamiento líquido cuando fluye a través de un agujero en el recipiente (Figura 3.c). Así como la diferencia de presión entre dos puntos del lecho, es proporcional a la diferencia entre sus alturas (Figura 3.d).



**Figura 3.** Comportamiento líquido de un lecho de partículas: (a) Los objetos ligeros flotan sobre la superficie del lecho; (b) La superficie se mantiene horizontal al inclinar el lecho; (c) Las partículas abandonan el lecho describiendo un chorro a través de un agujero practicado en la pared; (d) Al poner en contacto dos lechos sus niveles se igualan; (e) La diferencia de presión entre dos puntos del lecho es proporcional a la diferencia entre sus alturas. Fuente: Adaptado de Kunii y Levenspiel (1991).

Este comportamiento líquido permite idear varios esquemas de contacto entre el gas y las partículas sólidas. Como son el flujo en contracorriente, el flujo cruzado o la circulación de sólidos entre dos lechos.

Muchas veces, una de las más importantes propiedades en las operaciones industriales es este comportamiento líquido de los lechos fluidizados por su fácil y rápido transporte y su alto contacto con el gas.

#### 2.4. Ventajas y desventajas de los lechos fluidizados

Las principales ventajas de los lechos fluidizados en operaciones industriales se resumen en:

- 1) El suave flujo de partículas y su comportamiento líquido, permiten operaciones continuas automatizadas con un manejo fácil.
- 2) La elevada capacidad de mezclado que tienen los lechos fluidizados, permite una mayor homogeneidad de propiedades en el interior del lecho.
- 3) El rápido mezclado de los sólidos, permite acercarse a condiciones isotermas en todo el reactor, por lo tanto, la operación puede controlarse de forma sencilla y fiable.
- 4) Un recipiente de sólidos bien mezclados, representa un gran regulador térmico. Resiste variaciones muy rápidas en la temperatura, responde lentamente a cambios bruscos en las condiciones de operación y permite un gran margen de seguridad en reacciones exotérmicas.



- 5) La circulación de sólidos entre dos lechos fluidizados hace posible eliminar o añadir las grandes cantidades de calor que producido o necesario en grandes reactores.
- 6) Los lechos fluidizados se pueden utilizar en operaciones a gran escala.
- 7) La capacidad de transferencia de calor y de masa entre el gas y las partículas sólidas es alto comparado con otros métodos de contacto.
- 8) La capacidad de transferencia de calor entre un lecho fluidizado y un objeto inmerso en el lecho es alta, por lo tanto, los intercambiadores de calor en lechos fluidizados, requieren una superficie de contacto relativamente baja.

Sin embargo, los principales inconvenientes son:

- 1) En lechos burbujeantes de partículas finas, la dificultad para describir el flujo de gas, representa un contacto ineficiente. Esto se vuelve un problema crítico en procesos de transformación de gases.
- 2) El rápido mezclado de los sólidos en el lecho, induce que los tiempos de residencia en el reactor sean no uniformes. Para tratamientos continuos de sólidos, este problema da como resultado productos heterogéneos y un peor rendimiento.
- 3) Los sólidos desmenuzables, son pulverizados y arrastrados por el gas, por lo que se deben reemplazar.
- 4) La erosión producida por la abrasión de las partículas en las tuberías y recipientes, puede ser un serio problema.
- 5) En operaciones que requieran altas velocidades de fluidización, las partículas sólidas que sean arrastradas por el gas fuera del lecho, deberán ser recirculadas mediante ciclones o reemplazadas por nuevas partículas mediante un alimentador directamente al lecho.
- 6) En operaciones no catalíticas a alta temperatura, la aglomeración y sinterización de partículas finas puede requerir un descenso en la temperatura de operación, haciendo que el rendimiento sea mucho menor.
- 7) Para mantener la fluidización, el proceso requiere un gasto de potencia significativo.
- 8) Las velocidades operacionales del gas a las que un lecho puede ser fluidizado están limitadas en un rango.

El bajo coste es la principal característica por la que este procedimiento sea utilizado, pero el análisis de los factores influyentes y la minimización de las desventajas asegura el éxito como operación.

## 2.5. Factores influyentes en la fluidización

La facilidad con la cual las partículas son fluidizadas y el rango de operación que mantiene la fluidización difiere mucho frente a otros sistemas gas-sólido. Depende de muchos





factores, los principales que hay que tener en cuenta para el estudio de las operaciones de fluidización son:

- La densidad del gas, cuanto mayor sea esta, el gas tendrá más capacidad de sustentación y con mayor facilidad se producirá la fluidización.
- La viscosidad del gas, es un indicador del grado de fricción que existirá entre las partículas sólidas y el gas.
- La capacidad térmica y la conductividad del gas, tendrán influencia en los procesos en los que el gas sea incompresible o incluya transferencia de calor.
- La densidad de las partículas, cuanto mayor sea esta, mayor será el peso de las partículas y resultará más difícil mantenerlas en suspensión.
- El diámetro de las partículas, factor determinante en la capacidad de fluidización e influye directamente en los regímenes que adoptará el lecho.
- La porosidad del lecho, a mayor porosidad mayor superficie de contacto de las partículas con el gas, aumentando la fricción y la transferencia de calor entre las partículas y el gas.
- La esfericidad de las partículas, cuanto más esféricas sean las partículas, el gas se comportará de forma más ordenada.

## 2.6. Antecedentes y aplicaciones industriales

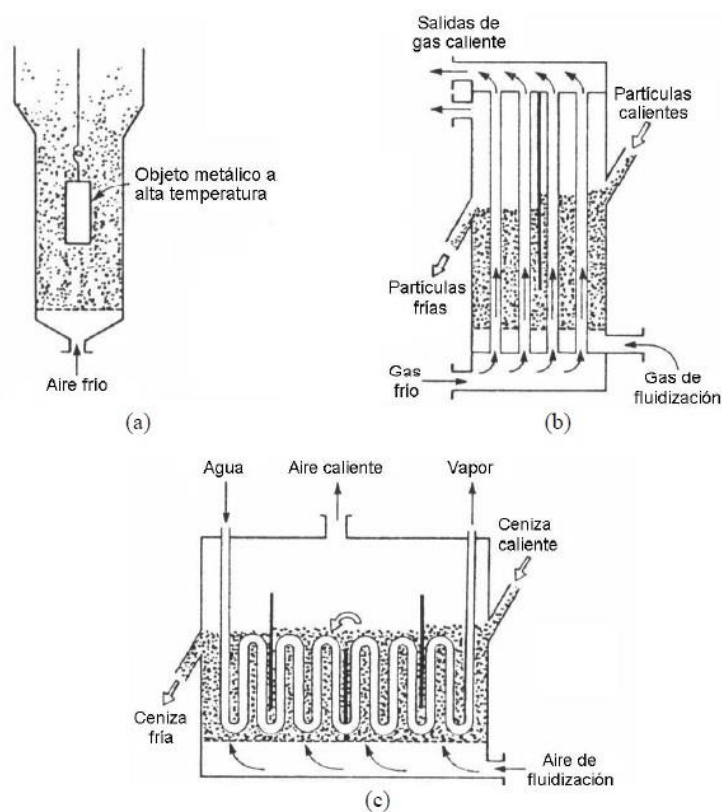
El proceso de fluidización comenzó su desarrollo en el campo de la minería y la ingeniería metalúrgica, en operaciones de extracción de minerales como la sedimentación y la clasificación de densidad. A pesar de esto, el proceso no empezó su desarrollo comercial hasta principios de la década de 1940 con la gasificación del carbón y otras operaciones relacionadas con el petróleo. Un ejemplo de estas operaciones es la obtención de combustible de alto octanaje, mediante la desintegración del petróleo.

### 2.6.1. Operaciones físicas

#### 2.6.1.1. Operaciones de intercambio de calor

Los lechos fluidizados se han usado principalmente como intercambiadores de calor entre las fases. Ya que presentan la capacidad de una rápida transferencia de calor y de mantener una temperatura uniforme a lo largo del lecho. Esta gran capacidad de transferencia de calor de los lechos fluidizados también se utiliza para operaciones de enfriamiento de metales o aleaciones rápidamente (Figura 4.a).

El intercambio de calor puede realizarse sin haber un contacto directo entre el lecho fluidizado y la superficie a la que se transfiere calor (Figura 4.b y 4.c). Un ejemplo de este tipo de operaciones sería un recuperador de calor, mediante tubos sumergidos en el lecho fluidizado a alta temperatura.



**Figura 4.** Ejemplos de intercambiadores de calor mediante lecho fluidizado: (a) enfriamiento rápido de metales; (b) intercambio de calor indirecto entre gas y partículas; (c) generación de vapor a partir de ceniza caliente. Fuente: Adaptado de Kunii y Levenspiel (1991).

#### 2.6.1.2. Recubrimiento de objetos metálicos

Mediante la fluidización, se pueden recubrir objetos metálicos con plásticos. Para realizar este proceso, se fluidizan finas partículas del material plástico mediante aire a temperatura ambiente. Se sumerge el objeto metálico en el lecho, a una temperatura superior a la temperatura de fusión del plástico, y al extraer el objeto tendrá una capa de recubrimiento plástico. El grosor de la capa corresponderá con el tiempo que haya estado sumergido el objeto metálico.

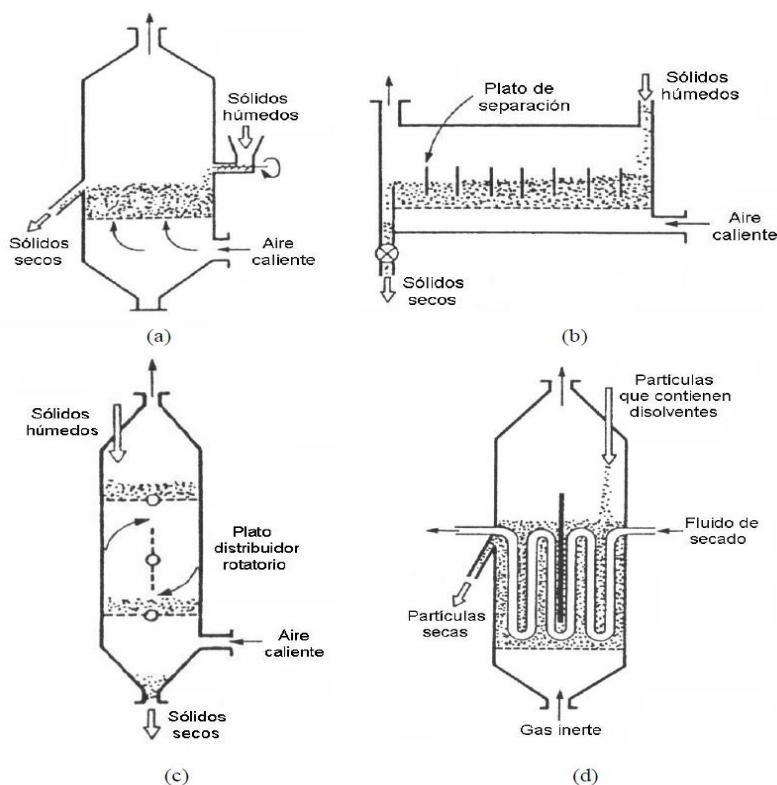
#### 2.6.1.3. Secado de sólidos

Los secadores de lecho fluidizado tienen un uso muy extendido y en mucha variedad de industrias. Debido a que tienen una gran capacidad, un bajo coste de construcción, una alta eficiencia térmica y además son sencillos de operar. Se pueden usar con cualquier tipo de sólidos húmedos, siempre que éstos puedan ser fluidizados por un gas caliente. Se emplean comercialmente para secado de minerales, arena, polímeros, productos farmacéuticos o fertilizantes. Las acerías usan grandes secadores de lecho fluidizado para secar el carbón antes de meterlo

en el horno. Por otro lado, la industria farmacéutica y la industria química emplean eficientes secadores de pequeño tamaño para sus procesos.

El principal factor a tener en cuenta en el secado de sólidos, es el tiempo de residencia de éstos en el lecho. En algunas operaciones, se necesitan tiempos de secado iguales para todas las partículas. Debido a esto, se plantean diferentes diseños de secadores, desde lechos simples usados en operaciones sencillas (Figura 5.a), a lechos multietapa, usados en operaciones que requieran un mayor control del tiempo de secado (Figura 5.b). Otro tipo de secadores son los rotativos, para hacer uniforme el tiempo de residencia de las partículas (Figura 5.c). Generalmente, en los procesos de secado mediante lecho fluidizado, el gas que se utiliza es aire caliente. Cuando los sólidos contienen altas cantidades de disolventes como metanol o tolueno, presentan un cierto riesgo de explosión (Figura 5.d). Para la fluidización puede usarse vapor de agua, gases inertes e incluso el propio vapor del disolvente para el secado, utilizando un intercambiador de tubos en sistema cerrado.

En el caso de que los sólidos tengan tendencia a apelmazarse o de que estén muy húmedos, pueden utilizarse lechos fluidizados con un distribuidor vibratorio o lechos fluidizados a altas presiones, respectivamente.



**Figura 5.** Fluidización en procesos de secados de sólidos: (a) secado en una etapa; (b) secado en multietapa; (c) secado con distribuidor rotativo para hacer uniforme el tiempo de residencia; (d) secado de partículas que contienen disolventes. Fuente: Adaptado de Kunii y Levenspiel (1991).



#### 2.6.1.4. Adsorción

Los procesos continuos de adsorción se usan en las ocasiones en las que es necesario eliminar componentes muy diluidos de grandes flujos de gas, estos componentes se eliminan en lechos fluidizados de múltiples etapas. Estos componentes a eliminar, se adsorben, a través de las distintas etapas fluidizadas, con partículas de carbón activo y posteriormente se eliminan con vapor. Los ciclos de adsorción y desorción, la regeneración del carbón activo, se llevan a cabo en el mismo lecho. Las operaciones que más se llevan a cabo son la retirada y concentración de distintos solventes como disulfuro de carbono, acetona, etanol, o la eliminación de trazas contaminantes en gases residuales.

#### 2.6.2. Reacciones de síntesis

Existe una principal característica que hace más adecuados a los lechos fluidizados que a los lechos fijos para el desarrollo de reacciones en fase gas con catalizadores sólidos. Esta es la necesidad de mantener un control muy estricto de la temperatura en la zona en la que se produce la reacción. Este tipo de reacciones, son altamente exotérmicas, lo que hace más difícil controlar la temperatura. Existen diversas razones por las cuales sea necesario ese control, como que la reacción sea explosiva fuera de un estrecho rango de temperaturas, la obtención de los productos sea dependiente de la temperatura o que las altas temperaturas en el catalizador lo deterioren.

En lechos fijos, se hace muy difícil alcanzar el control necesario de la temperatura. Debido a que los gases tienen bajos coeficientes de transferencia de calor y valores muy pequeños de su capacidad calorífica comparados con sus calores de reacción. Este control, se realiza de forma mucho más fácil mediante lechos fluidizados. Ya que la rápida circulación de las partículas, con alta capacidad calorífica, permite una distribución del calor más eficiente y ayuda a eliminar posibles zonas en las que haya altas concentraciones de calor.

Los principales ejemplos de reacciones de síntesis mediante lechos fluidizados son:

- En lecho fluidizado de partículas finas: anhídrido ftálico, acetato de vinilo, acrilonitrilo, dicloruro de etileno, clorometano o anhídrido maleico.
- En lecho fluidizado burbujeante de partículas gruesas: polietileno y polipropileno.
- En lecho fluidizado rápido: síntesis de Fischer-Tropsch.

#### 2.6.3. Craqueo de hidrocarburos



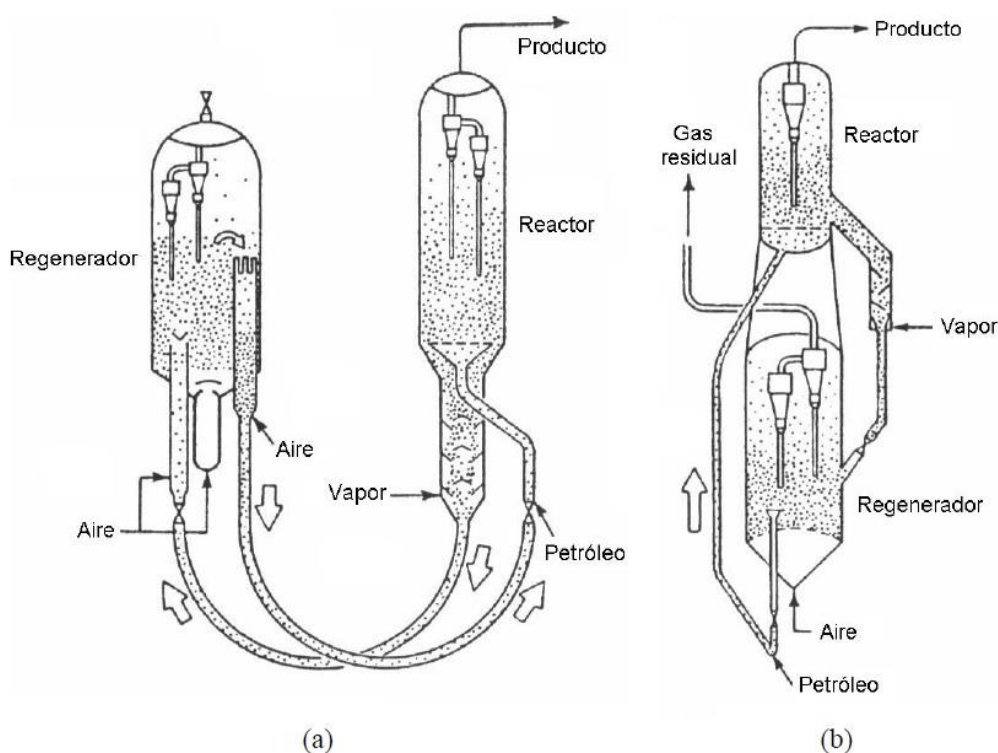
Las denominadas reacciones de craqueo, rotura catalítica de hidrocarburos en elementos de menor peso molecular, están dominadas por dos características fundamentales. Son reacciones endotérmicas y se producen deposiciones de carbón en la superficie de los sólidos cercanos. Además de estas características, las grandes cantidades de material a tratar, determinan el tipo de proceso que se utiliza industrialmente.

Generalmente, este tipo de procesos tiene un módulo para la absorción de calor, la reacción y la deposición de carbón, y otro módulo donde el carbón depositado se quema y se recupera el calor. El calor recuperado se devuelve al primer módulo, para alimentar la reacción, mediante las partículas en recirculación. La única manera de que este proceso se pueda llevar a cabo de manera eficiente es con un sistema de circulación de sólidos mediante uno o más lechos fluidizados. Todos los procesos de craqueo que se realizan en la actualidad se basan en este tipo de operación.

#### 2.6.3.1. Craqueo catalítico fluido (FCC)

En contacto con un catalizador adecuado, los hidrocarburos pesados en fase vapor, se rompen en elementos de menor peso molecular. Para realizar esta operación con éxito, es clave la forma en la que se suministra la gran cantidad de calor, necesaria para la reacción endotérmica. También es importante contar con una manera efectiva de regenerar las partículas catalizadoras rápidamente. Este proceso de craqueo catalítico fluido (FCC, del inglés Fluid Catalytic Cracking) realiza a la vez la regeneración de las partículas catalizadoras y el suministro del calor de reacción de forma sencilla.

La principal característica del proceso FCC es la unión de dos módulos. En primer lugar existe un reactor a una temperatura entre 480 y 540 °C, donde el petróleo suministrado en fase vapor, se divide en contacto con las partículas catalizadoras a alta temperatura. Después de un determinado tiempo de residencia, esas partículas se envían al regenerador, que se encuentra a una temperatura aproximada de 580 °C. Es en el regenerador donde los depósitos de carbono se queman y se reducen hasta un 2%. Pasado un cierto tiempo, las partículas, aún calientes, son enviadas de vuelta al reactor.

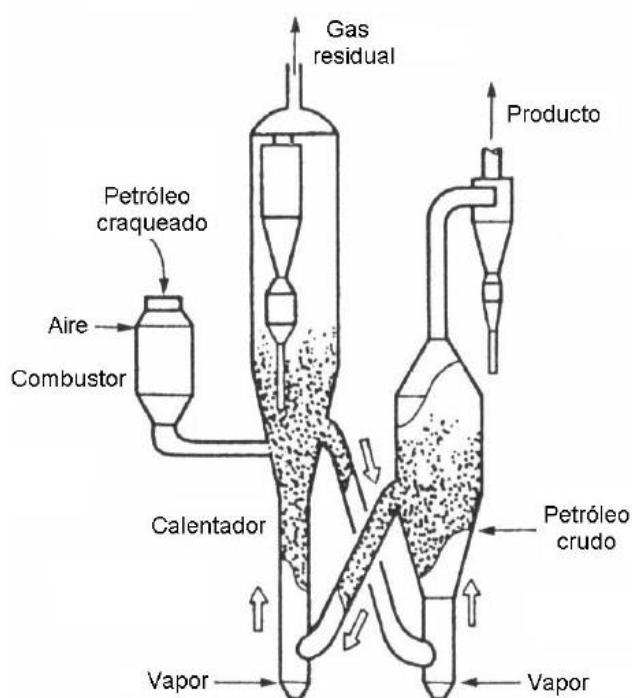


**Figura 6.** Sistemas de craqueo catalítico fluido: (a) modelo Exxon IV; (b) modelo diseñado por la Universal Oil Products Company. Fuente: Adaptado de Kunii y Levenspiel (1991).

A pesar de la existencia de diferentes diseños basados en el proceso FCC (Figura 6), ya sea la conjunción entre el reactor y el regenerador o el tipo y tamaño de las partículas catalizadoras, en todos ellos los fundamentos son los mismos y todos los casos implican la utilización de lechos fluidizados.

#### 2.6.3.2. Craqueo térmico

El proceso de craqueo térmico más utilizado es la producción de etileno y propileno. Este proceso se forma a partir de la fragmentación de nafta procedente del petróleo, mediante el uso de reacciones endotérmicas.



**Figura 7.** Proceso de fluidización en craqueo térmico (diseño Kunii-Kunugi). Fuente: Adaptado de Kunii y Levenspiel (1991).

Se han desarrollado procesos con sistemas de un solo lecho fluidizado, sin embargo son los sistemas de dos lechos fluidizados con una recirculación de partículas, los que suponen un proceso de mayor éxito. Un ejemplo es el proceso Kunii-Kunugi, se basa en la fluidización en fase densa para prevenir el atasco de los conductos de transporte (Figura 7). En este proceso se utilizan partículas de coque a una temperatura aproximada de 750 °C, que circulan entre el reactor y el regenerador.

#### 2.6.4. Combustión e incineración

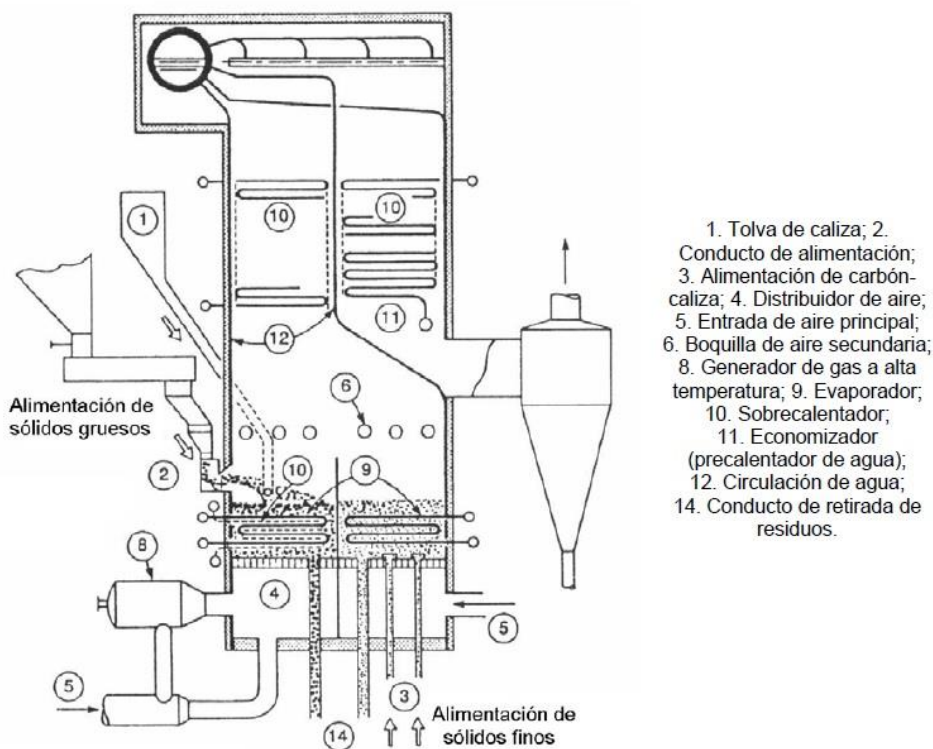
##### 2.6.4.1. Combustión de carbón

Con la crisis del petróleo y con la esperanza de encontrar un sistema alternativo de combustión. Tanto para carbón de baja calidad, como de combustibles que no se pudieran quemar en calderas convencionales, se empezó a desarrollar la combustión en lecho fluidizado (FBC, del inglés Fluidized Bed Combustion) (Figura 8). Este tipo de operación comenzó entre las décadas de 1960 y 1970.

El diseño típico de FBC es el basado en un lecho fluidizado burbujeante a presión atmosférica, donde se fluidiza un lecho de partículas de caliza o de dolomita mediante aire. Posteriormente se inyectan pequeñas partículas de carbón. Estas partículas, suelen contener carbono sin quemar, pueden ser atrapadas y



quemadas o devueltas al lecho por medio de ciclones. Las partículas de caliza y de dolomita capturan los componentes de azufre más eficientemente a una temperatura aproximada de 850 °C.



**Figura 8.** Combustión de carbón en lecho fluidizado burbujeante. Fuente: Adaptado de Kunii y Levenspiel (1991).

Los lechos fluidizados presentan la ventaja de que al trabajar a temperaturas menores que otras tecnologías de combustión de carbón pulverizado, reducen las emisiones de  $\text{NO}_x$  y de  $\text{SO}_x$ .

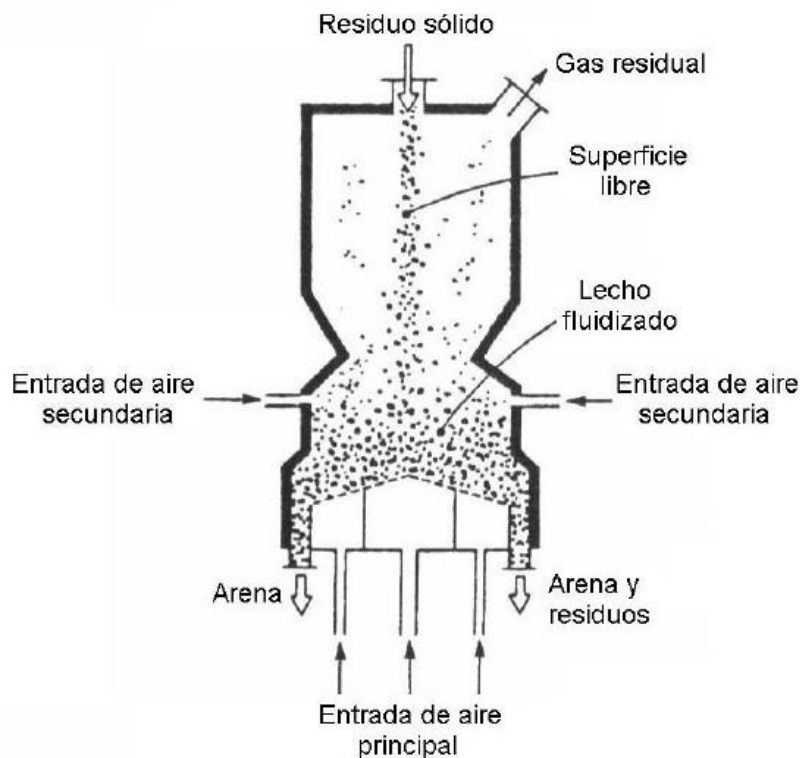
Además de este diseño de combustión de carbón en lecho fluidizado, existen otros diseños comerciales a pequeña y gran escala, y que operan a presión atmosférica o a alta presión.

#### 2.6.4.2. Incineración de residuos sólidos

La incineración de residuos sólidos urbanos en áreas pobladas es algo inevitable, para este propósito se utilizan incineradores de parrilla. Este tipo de sistemas, aunque son térmicamente eficientes, son problemáticos debido a la emisión de olores nocivos provenientes de los gases de combustión. Este problema puede evitarse usando incineradores de lecho fluidizado, ya que permiten quemar de forma más eficiente combustibles de bajo poder calorífico y alto contenido en cenizas, como son los residuos sólidos (Figura 9).



En el proceso, los residuos son triturados, habiendo retirado previamente los elementos metálicos mediante separadores magnéticos. Posteriormente, los restos, son fluidizados en el incinerador. La temperatura de operación se encuentra entre 800 y 900 °C, así la materia orgánica se descompone y se quema. Los sólidos son completamente quemados y las cenizas, se eliminan por la parte inferior del lecho. El calor sobrante, se elimina mediante la circulación de agua, pudiendo así aprovechar el excedente de energía.



**Figura 9.** Ejemplo de diseño de incineración de sólidos en lecho fluidizado. Fuente: Adaptado de Kunii y Levenspiel (1991).

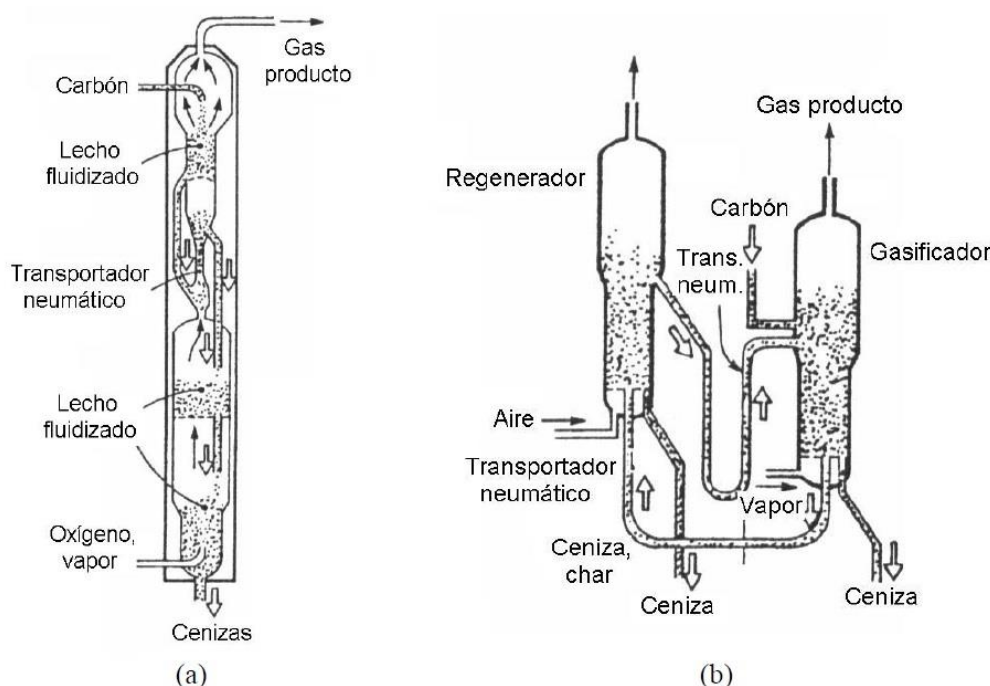
Con el fin de mejorar la eficiencia de estos sistemas, se debería realizar un tratamiento de los residuos en el que se eliminan los residuos inorgánicos. Además en cualquier tipo de sistema, es necesario colocar filtros para asegurar la calidad de las emisiones.

#### 2.6.5. Gasificación

La gasificación es el proceso por el cual elementos que contienen carbono, son transformados en un gas combustible en presencia de un agente gasificante mediante reacciones a alta temperatura. Normalmente los agentes gasificantes son aire, oxígeno, vapor de agua o hidrógeno. El poder calorífico del gas sintético resultante, depende del combustible sólido de origen, el tipo de agente gasificante y las condiciones en las que ocurren las reacciones.

### 2.6.5.1. Gasificación de carbón

La gasificación del carbón fue una de las primeras aplicaciones industriales de importancia de los lechos fluidizados. Este proceso se ha utilizado mucho para la obtención de gas combustible a partir del carbón. Sin embargo, esta aplicación se ha visto desplazada por la utilización de otros combustibles más efectivos como el petróleo o el gas natural.



**Figura 10.** Gasificación de carbón en lecho fluidizado: (a) proceso Hygas diseñado por el Institute of Gas Technology; (b) proceso diseñado por Union Carbide. Fuente: Adaptado de Kunii y Levenspiel (1991).

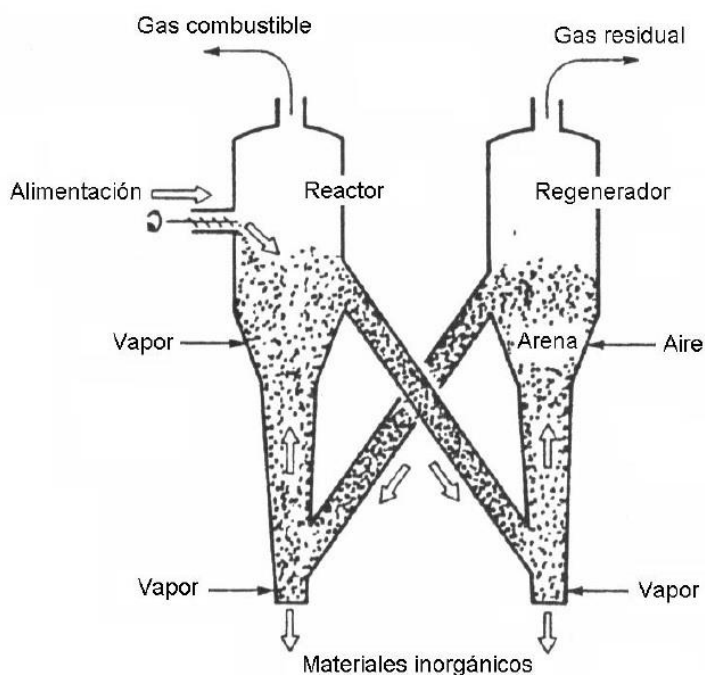
Se han desarrollado múltiples diseños de gasificadores de carbón en lecho fluidizado (Figura 10). Desde procesos con un solo lecho fluidizado hasta procesos con múltiples lechos, con recirculación de partículas, que pueden operar a altas presiones y fluidizados con diferentes agentes gasificantes.

### 2.6.5.2. Gasificación de residuos sólidos

Debido a que los residuos sólidos suelen contener materiales tóxicos y peligrosos, en las plantas de incineración se necesitan equipos de limpieza de gases de escape. Sin embargo, en las plantas de gasificación de residuos sólidos, la limpieza de los gases de escape, resulta más sencilla y barata, porque el volumen de gas producido es menor que en los incineradores, resultando así el tratamiento de residuos sólidos mucho más ventajoso.

Un ejemplo de gasificador, es el empleado en el proceso Pyrox (Figura 11). En este proceso, se utilizan dos lechos fluidizados conectados entre sí. Los residuos

triturados son enviados junto con vapor, al reactor para producir gas combustible. Los sólidos sobrantes se envían al regenerador, junto con la arena del lecho, para producir su combustión. Posteriormente los gases residuales se expulsan, mientras que la arena caliente se devuelve al gasificador, proporcionando energía.

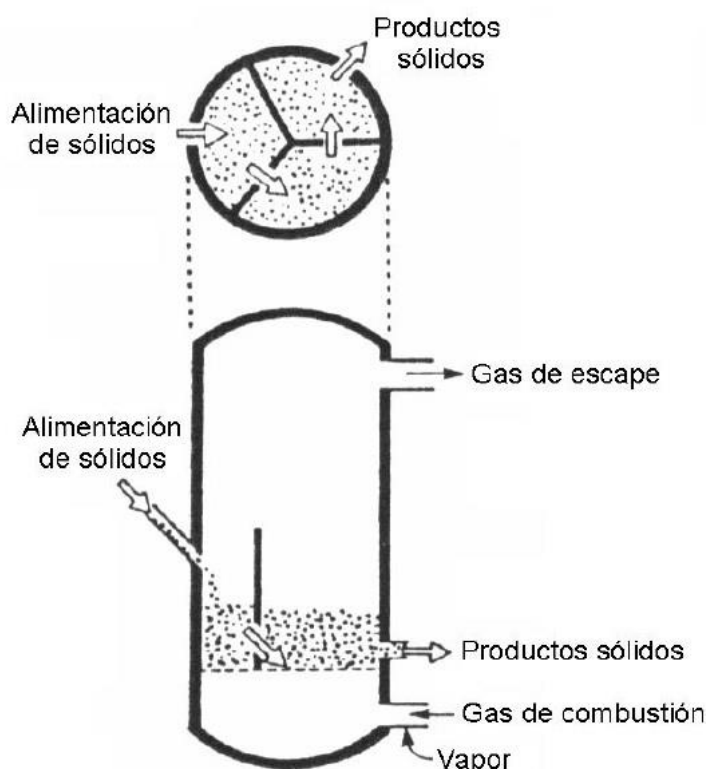


**Figura 11.** Gasificación de residuos sólidos en lecho fluidizado, proceso Pyrox. Fuente: Adaptado de Kunii y Levenspiel (1991).

#### 2.6.5.3. Activación del carbón

El carbón activado se utiliza como catalizador para la adsorción de contaminantes en corrientes gaseosas y líquidas, para la separación de sustancias orgánicas y en la recuperación de solventes. En la activación del carbón en lecho fluidizado se utiliza como materia prima carbón, madera y residuos vegetales, como la cáscara de coco o cacahuete.

El proceso se divide en dos fases, la carbonización de los sólidos y la activación o gasificación del carbonizado. Durante la carbonización se eliminan de los sólidos elementos como el hidrógeno y el oxígeno, para obtener una estructura más parecida a la del carbón. En la gasificación, el carbonizado se fluidiza con un agente oxidante (aire, oxígeno, vapor de agua o una combinación de estos), a una temperatura entre 800 y 1000 °C. De esta forma se eliminan los átomos de carbono. Esto significa que aumenta el volumen de poros y la superficie específica.

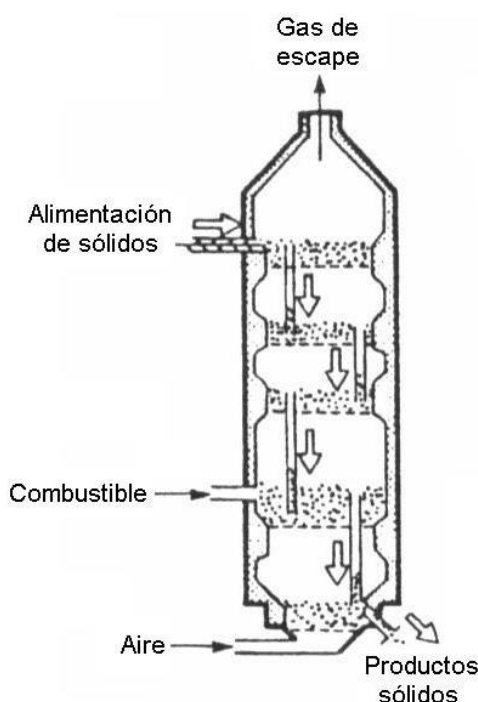


**Figura 12.** Activación de carbón en lecho fluidizado. Fuente: Adaptado de Kunii y Levenspiel (1991).

Generalmente, los lechos fluidizados que se utilizan para este proceso, suelen ser lechos multietapa, de esta manera, la distribución del tiempo de residencia de las partículas, es más uniforme (Figura 12). Además, ayudan a recuperar el calor para la gasificación, mediante una combustión secundaria del hidrógeno y del monóxido de carbono procedentes de los sólidos del proceso de carbonización.

#### 2.6.6. Calcinación

En un lecho fluidizado, las partículas de caliza y de dolomita se pueden calcinar de forma sencilla quemando combustible directamente en el lecho. La reacción de calcinación es altamente endotérmica, por lo que supone un elevado gasto de combustible. Para recuperar parte de ese calor perdido en el proceso, se emplean sistemas multietapa (Figura 13). En estos sistemas, la alimentación de partículas de material está en la parte superior del reactor y van cayendo etapa a etapa. El combustible se inyecta en una de las etapas inferiores, mezclándose con el aire de la fluidización y quemando las partículas que van descendiendo. El calor residual asciende por las etapas superiores, aumentando la temperatura de las partículas. Los restos ya calcinados, abandonan el lecho por la parte inferior.



**Figura 13.** Calcinación de caliza en lecho fluidizado. Fuente: Adaptado de Kunii y Levenspiel (1991).

#### 2.6.7. Reacciones con sólidos

Los lechos fluidizados, también pueden ser utilizados con el objetivo de modificar las propiedades de ciertos minerales.

Una de los procesos que se dan en este caso, es el de tostación de minerales de sulfuro, para la obtención de metales. En esta aplicación, la reacción que se produce es una oxidación levemente exotérmica. Debido a esto se suelen utilizar lechos fluidizados de una sola etapa sin evacuación de calor o, si es necesario, con una ligera refrigeración. Estos sistemas, requieren un menor exceso de aire, por lo que los gases de escape resultantes tienen una alta concentración de dióxido de azufre, que se deberán tener en cuenta para cumplir con las exigencias medioambientales.

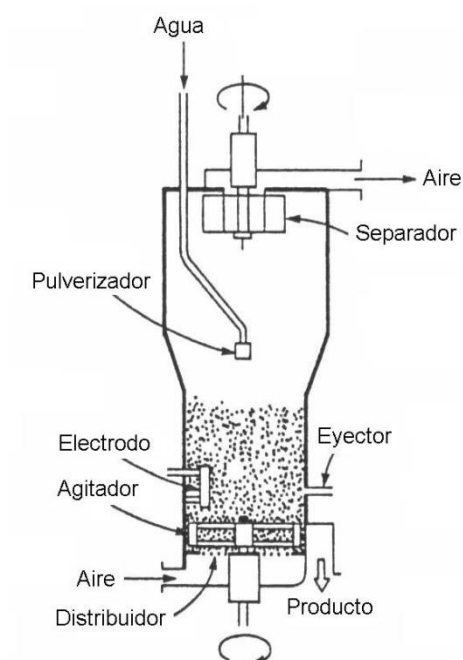
Para la obtención de silicio de gran pureza, usado en la fabricación de células solares y semiconductores, también se utilizan aplicaciones basadas en lechos fluidizados. El silicio de gran pureza se obtiene a partir de silicio de grado metalúrgico o a partir de tetracloruro de silicio líquido, mediante varias etapas en las que se utilizan lechos fluidizados.

Otra aplicación basada en lechos fluidizados es la reducción de óxidos de hierro, proceso utilizado para la producción de hierro y acero, a partir de partículas de mineral de alto grado. En esta aplicación se han desarrollado procesos con sistemas de varias etapas hasta sistemas donde la reducción se hace de forma directa.

#### 2.6.8. Biofluidización

El cultivo de microorganismos es una de las aplicaciones más peculiares de los lechos fluidizados. El hecho de cultivar los microorganismos en lechos fluidizados, tiene características más ventajosas que el cultivo convencional. Como una mayor efectividad en el crecimiento de la superficie de los microorganismos, una transferencia de oxígeno más fácil que resulta en una activación del metabolismo, la eficiente eliminación del calor y del dióxido de carbono generado por el metabolismo y además la facilidad para controlar la temperatura, la humedad y el PH.

Incluso en la producción de salsa de soja se emplean lechos fluidizados (Figura 14), es un diseño pionero desarrollado para cultivar el hongo "*Aspergillus Sojae*".



**Figura 14.** Biofluidización, producción de salsa de soja en lecho fluidizado. Fuente: Adaptado de Kunii y Levenspiel (1991).

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA FLUIDIZACIÓN

En este capítulo, se van a tratar los aspectos teóricos de la fluidización, como es el caso de la pérdida de carga o presión en el lecho, así como la velocidad de mínima fluidización o la caracterización de las partículas. La información mostrada en este capítulo, así como ecuaciones y tablas, se ha extraído del Kunii y Levenspiel (1991).

#### 3.1. Propiedades de las partículas

- Esfericidad

Normalmente, las partículas presentes en un lecho fluidizado, no tienen una forma completamente esférica, suelen presentar irregularidades. Para definir la geometría de las partículas, se recurre a la esfericidad, que es la relación entre la superficie de una esfera y la superficie de una partícula, con el mismo volumen.

$$\phi = \left( \frac{\text{área superficial de la esfera}}{\text{área superficial de la partícula}} \right)_{\text{mismo volumen}} \quad (3.1)$$

Por medio de esta ecuación, se puede determinar la esfericidad de las partículas, cuyo valor está en el rango entre 0.5 y 0.9.

- Densidad de las partículas

La densidad de las partículas, se define como la masa de la partícula,  $m_p$ , entre el volumen que ocupa la propia partícula o el volumen que ve el fluido al rodear la partícula, incluyendo todas las imperfecciones y los poros que pueda tener. Este volumen, se denomina volumen hidrodinámico,  $V_h$ .

$$\rho_s = \frac{m_p}{V_h} \quad (3.2)$$

- Densidad del lecho

La densidad aparente del lecho, es más sencilla de obtener que la densidad de cada partícula, por lo que normalmente se usa esta densidad. Se obtiene como la masa total de las partículas que contiene el lecho,  $m_b$ , entre el volumen que ocupan, incluyendo el espacio existente entre las mismas. Este volumen, se denomina volumen aparente,  $V_{ap}$ .

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_{ap}} \quad (3.3)$$

- Fracción de vacío del lecho

La fracción de vacío del lecho, está definida como la relación entre los espacios entre partículas y el volumen que ocupan estas en el lecho.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sum V_h}{V_{ap}} \quad (3.4)$$

### 3.2. Pérdida de carga

Un gas con movimiento ascendente a través de un lecho de partículas, sufre una pérdida de carga debido a la resistencia que ofrecen estas partículas al paso del gas. Esta pérdida de presión se ve aumentada con el incremento de la velocidad del gas. Como ya se ha explicado en el capítulo anterior, para que un lecho fijo empiece a fluidizar, el gas tiene que contrarrestar el peso de las partículas, haciendo que estas queden sustentadas por el propio gas.

La pérdida de carga, siempre positiva, a través de un lecho de partículas isotrópicas de un solo tamaño, ha sido correlacionada por la ecuación de Ergun (Kunii y Levenspiel, 1991).

$$\frac{\Delta p}{H} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u}{(\phi d_p)^2} + 1.75 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g u^2}{\phi d_p} \quad (3.5)$$

Siendo  $H$  la longitud del lecho fluidizado,  $u$  la velocidad del flujo,  $\mu$  la viscosidad dinámica del fluido,  $\rho_g$  la densidad del fluido,  $\phi$  la esfericidad de las partículas,  $d_p$  el diámetro de las partículas y  $\varepsilon$  la fracción de vacío.

En esta ecuación, se diferencian dos términos. El primer término, se refiere a los esfuerzos viscosos, que predominan a bajos números de Reynolds ( $Re < 10$ ), cuando el flujo es laminar. El segundo término, se refiere a los esfuerzos inerciales, predominantes a altos números de Reynolds ( $Re > 2000$ ), cuando el flujo es turbulento. El número de Reynolds para lechos fluidizados se define mediante la siguiente expresión.

$$Re = \frac{\rho_g d_p u}{\mu} \quad (3.6)$$

### 3.3. Velocidad de mínima fluidización

La velocidad de mínima fluidización, define el tránsito de un lecho fijo a un lecho fluidizado, tal como se define en el apartado 2.2.2. Cuando se alcance esta velocidad, las



fuerzas de arrastre de la corriente de fluido, se igualarán al peso de las partículas, entonces comenzará la fluidización. Donde se define

$$A_t \Delta p = A_t H_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) g \quad (3.7)$$

Simplificando esta ecuación, se obtiene una expresión en función de la caída de presión.

$$\frac{\Delta p}{H_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) g \quad (3.8)$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación 3.5, resultará una expresión en función de la velocidad de mínima fluidización.

$$(1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) g = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu u_{mf}}{(\phi d_p)^2} + 1.75 \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho_g u_{mf}^2}{\phi d_p} \quad (3.9)$$

Reordenando y simplificando términos.

$$\frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2} \left( \frac{\rho_g d_p u_{mf}}{\mu} \right) + \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi} \left( \frac{\rho_g d_p u_{mf}}{\mu} \right)^2 \quad (3.10)$$

En esta ecuación, conociendo las propiedades del fluido y de las partículas sólidas, así como la fracción de vacío, se puede obtener la velocidad de mínima fluidización. Esta ecuación se puede simplificar, mediante parámetros adimensionales como son el número de Reynolds de mínima fluidización (3.11) y el número de Arquímedes (3.12).

$$Re_{mf} = \frac{\rho_g d_p u_{mf}}{\mu} \quad (3.11)$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (3.12)$$

$$Ar = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2} Re_{mf} + \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi} Re_{mf}^2 \quad (3.13)$$

En determinados casos, se puede simplificar la ecuación para obtener de una forma más sencilla la velocidad de mínima fluidización. Es el caso en el que las partículas son muy pequeñas, obteniendo una ecuación simplificada.

$$u_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{150 \mu} \frac{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2}{1 - \varepsilon_{mf}}, \quad Re_{mf} < 20 \quad (3.14)$$

De la misma manera, para partículas muy grandes, la ecuación simplificada resulta.

$$u_{mf}^2 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{1.75 \rho_g} \varepsilon_{mf}^3 \phi, \quad Re_{mf} > 1000 \quad (3.15)$$

En el caso de que la fracción de vacío o la esfericidad de las partículas no son conocidas, se puede estimar la velocidad de mínima fluidización mediante parámetros empíricos. Primero se reescribe la ecuación de la siguiente manera.

$$K_1 Re_{mf}^2 + K_2 Re_{mf} = Ar \quad (3.16)$$

Donde los parámetros  $K_1$  y  $K_2$  se definen como.

$$K_1 = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi} \quad K_2 = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2} \quad (3.17)$$

Varios investigadores han obtenido diferentes valores para los parámetros  $K_1$  y  $K_2$  (Tabla 1).

<i>Investigators</i>	<i>First, K<sub>2</sub>/2K<sub>1</sub></i>	<i>Second, 1/K<sub>1</sub></i>
Wen and Yu [12] (1966)	33.7	0.0408
284 data points from the literature		
Richardson [13] (1971)	25.7	0.0365
Saxena and Vogel [14] (1977)	25.3	0.0571
Dolomite at high temperature and pressure		
Babu et al. [15] (1978)	25.3	0.0651
Correlation of reported data until 1977		
Grace [16] (1982)	27.2	0.0408
Chitester et al. [17] (1984)	28.7	0.0494
Coal, char, Ballotini; up to 64 bar		

Tabla 1. Valores de los parámetros  $K_1$  y  $K_2$ .

Para la utilización de estos valores, se resuelve la ecuación en condiciones de mínima fluidización y se obtiene la siguiente relación.

$$Re_{mf} = \frac{\rho_g d_p u_{mf}}{\mu} = \left[ \left( \frac{K_2}{2K_1} \right)^2 + \frac{1}{K_1} Ar \right]^{1/2} - \frac{K_2}{2K_1} \quad (3.18)$$

### 3.4. Diagrama Pérdida de Carga – Velocidad

El diagrama es muy útil, ya que resulta una primera aproximación de la calidad de la fluidización (Figura 15). El diagrama representa la variación de la presión en función de la velocidad de fluidización del gas.

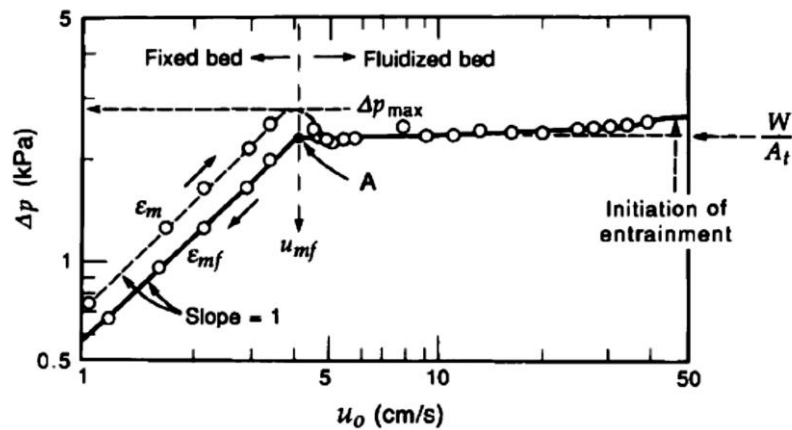


Figura 15. Curva Pérdida de carga vs Velocidad del Gas. Fuente: Kunii y Levenspiel (1991).

Existen dos zonas bien diferenciadas, cuando es un lecho fijo y cuando el lecho ya está fluidizado, el punto de inflexión entre estas dos zonas se establece por la velocidad mínima de fluidización.

Cuando es un lecho fijo la pérdida de carga es aproximadamente proporcional a la velocidad y aumenta de forma lineal con esta. Partiendo de velocidad nula, al ir incrementando la velocidad, el salto de presión que habría que vencer para que el lecho empezara a fluidizar, es mayor que el salto de presión si se va disminuyendo la velocidad del fluido. Para conseguir que el lecho esté fluidizado, antes de alcanzar la velocidad de mínima fluidización, se llega a un salto de presión superior al necesario para fluidizar el lecho, este es la máxima pérdida de carga. Cuando el lecho ya está fluidizado, el salto de presión es aproximadamente constante con respecto a la velocidad del fluido, con una ligera pendiente ascendente.

### 3.5. Efecto de la presión y de la temperatura

Los efectos de la presión en un lecho fluidizado han sido estudiados por numerosos investigadores, teniendo en cuenta el comportamiento de los factores que determinan el lecho fluidizado.

- La fracción de vacío de mínima fluidización aumenta ligeramente, del 1 al 4%, con un incremento de la presión de operación.
- La velocidad de mínima fluidización disminuye con un aumento de la presión de operación. Sin embargo, este descenso es inapreciable en lechos de partículas pequeñas,  $d_p < 100\mu m$ , pero se vuelve significativo con variaciones de hasta el 40% en partículas grandes,  $d_p > 360\mu m$ .



- La relación entre la velocidad a la que aparecen las burbujas y la de mínima fluidización se incrementa sobre un 30% al aumentar la presión de operación.

El efecto de la temperatura también ha sido estudiado combinando los efectos de altas temperaturas y alta presión. Sin embargo existen algunas contradicciones en los resultados obtenidos.

- La fracción de vacío de mínima fluidización aumenta con la temperatura hasta un 8% por encima de 500 °C. Al obtener un valor correcto de la porosidad, se puede predecir razonablemente la velocidad de mínima fluidización.

### 3.6. Burbujas en lechos fluidos

Muchas de las propiedades características de los lechos fluidizados, están influenciadas por el comportamiento de las burbujas. Esto hace esencial el análisis de las burbujas y su comportamiento, para el estudio y el diseño de operaciones con lechos fluidizados.

#### 3.6.1. Formación y crecimiento de las burbujas

La formación de las burbujas en un lecho fluidizado, se produce de manera similar a una formación de burbujas de gas en un líquido de baja viscosidad. Su comportamiento también es de forma parecida. Al introducir gas en un líquido a través de un orificio, se forma un tren de burbujas que asciende a la superficie, desplazando el líquido a su alrededor. En su movimiento ascendente, se pueden unir con otras, formando burbujas de mayor tamaño. Cuando estas burbujas de gas alcanzan la superficie, estallan, provocando fluctuaciones de presión.

Lo que ocurre en un lecho fluidizado por gas es similar a lo sucedido en un líquido, se inyecta gas a través del distribuidor y se forman burbujas. Al ascender por el lecho provocan fluctuaciones de presión locales a su paso. La formación de las burbujas ocurre cuando el lecho ya ha fluidizado, ya que la velocidad mínima para que se formen, es superior a la velocidad mínima de fluidización. A continuación se exponen algunas características semejantes con la formación de burbujas en un líquido.

- Las burbujas pequeñas tienen forma esférica, mientras que las burbujas más grandes son de forma aplanada.
- Las burbujas pequeñas ascienden con una velocidad menos que las burbujas grandes.
- Las burbujas pueden coalescer para formar burbujas de mayor tamaño. La burbuja formada, asciende en la misma dirección, aunque con una velocidad diferente.
- Las burbujas pueden unirse de dos maneras, mediante la incorporación una burbuja en el frente o por el movimiento horizontal en el camino de otra burbuja, incorporándose a ella.

- El exceso de gas que se inyecta en los lechos fluidizados, forma burbujas a su paso por el lecho.
- El valor de la fracción de vacío de las partículas es aproximadamente igual al valor de la fracción de vacío en condiciones de mínima fluidización.
- A muy altas velocidades, las burbujas producen grandes fluctuaciones, así como arrastre de sólidos.
- El efecto de las paredes, actúa en la misma dirección que la velocidad de ascenso de las burbujas.
- Al contrario que en los sistemas de gas-líquido, existe un intercambio de gas entre la burbuja y la fase densa en un lecho fluidizado.

### 3.6.2. Parámetros de las burbujas

La velocidad de ascenso de las burbujas depende de los mismos factores y se puede describir con las mismas expresiones en los sistemas gas-líquido y en los sistemas con lechos fluidizados. En un líquido, la velocidad de una burbuja grande con forma de casquete esférico, es descrita mediante la expresión de Davies y Taylor (1950).

$$u_{br} = \frac{2}{3}(gR_n)^{1/2} \quad (3.19)$$

Donde  $R_n$ , es el radio de curvatura de la burbuja.

La velocidad de ascenso de las burbujas, medida experimentalmente por Davidson y posteriormente también por otros investigadores, se ha resumido en la expresión.

$$u_{br} = 0.711(gd_b)^{1/2} \quad (3.20)$$

Siendo  $d_b$ , el diámetro de una esfera con el mismo volumen que la burbuja estudiada. El efecto de las paredes no tiene efecto en la velocidad de ascenso, mientras se cumpla que la relación entre el diámetro de la esfera del mismo volumen que la burbuja y el ancho del lecho sea menor que 0.125, es decir  $d_b/A_t < 0.125$ . El efecto de las paredes, disminuiría la velocidad de ascenso de las burbujas.

Muchos autores han propuesto distintas correlaciones para estimar el diámetro de las burbujas, sin embargo en este caso, se utilizará la expresión dada por Darton (1977), en el que se puede obtener el diámetro de la burbuja, a partir de la velocidad del gas.

$$d_b = 0.544(u - u_{mf})^{0.4} \cdot (z + 4\sqrt{A_0})^{0.8} \cdot g^{-0.2} \quad (3.21)$$

En esta expresión,  $z$  es la distancia desde el distribuidor al punto de medida y  $A_0$  es el área del distribuidor por orificio.

$$A_0 = A_t/Nr \quad (3.22)$$

Siendo  $Nr$  el número de orificios del distribuidor y  $A_t$  el área transversal del lecho.

Cuando la velocidad del gas es alta, las burbujas crecen mucho justo a la salida del distribuidor y coalescen, por lo que la expresión anterior no es válida, es necesaria una expresión con la que se pueda obtener el diámetro de la burbuja a la salida del distribuidor.

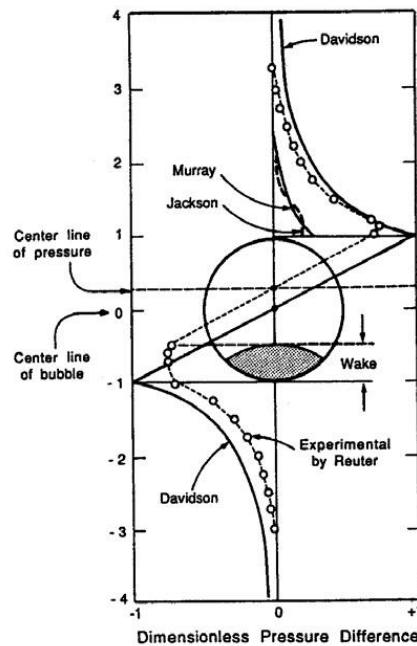
$$d_{b0} = \frac{2.78}{g} (u - u_{mf})^2 \quad \text{para } d_{b0} > l_{or} \quad (3.23)$$

Siendo  $l_{or}$  la distancia entre orificios adyacentes del distribuidor.

Para velocidades del gas muy elevadas, se puede producir el fenómeno de *slugging*. A partir de las expresiones anteriores, se puede obtener el diámetro de las burbujas, para después compararlo con el área transversal del lecho, ya que se puede afirmar que se produce slugging cuando  $d_b/A_t > 0.6$ .

### 3.6.3. Modelo de Davidson

El modelo de Davidson (1963), fue el primer modelo fiable de descripción del movimiento de gas y de sólidos, además del análisis de la distribución de presión en el movimiento ascendente entorno a una burbuja (Figura 16).



**Figura 16.** Comparación de la distribución de presión alrededor de una burbuja entre el modelo de Davidson y los datos experimentales de Reuter. Fuente: Kunii y Levenspiel (1991).

Es un modelo sencillo, de gran utilidad y de fácil aplicación, por lo que se han propuesto extensiones y análisis alternativos posteriores. Desarrollado para dos y tres dimensiones, está basado en los siguientes postulados.

1. Una burbuja de gas no contiene sólidos y tiene una forma esférica en tres dimensiones, mientras que su forma es cilíndrica en dos dimensiones.
2. Mientras una burbuja asciende, las partículas se apartan como un líquido incompresible, no viscoso y de densidad aparente  $\rho_s(1 - \varepsilon_{mf})$ .
3. El gas fluye en la fase de emulsión como un fluido viscoso e incompresible, por lo tanto, la velocidad relativa entre el gas y los sólidos debe satisfacer la ley de Darcy, para cualquier dirección.

$$(u_{gas} - u_{solidos})_x = -K \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.24)$$

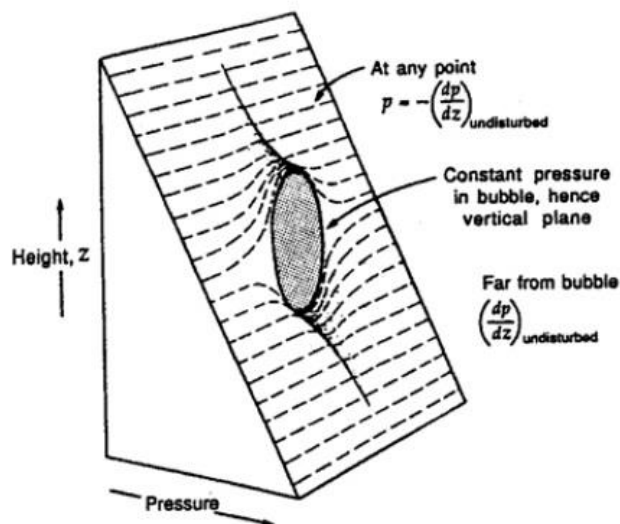
También se imponen las siguientes condiciones de contorno en el desarrollo.

- Lejos de la burbuja, existe un gradiente de presión que viene determinado por la ecuación.

$$\frac{\Delta p}{H_0} = (1 - \varepsilon_0)(\rho_s - \rho_g)g \quad (3.25)$$

- La presión en la burbuja, es constante.

Mediante los postulados y las condiciones de contorno, es suficiente para describir el patrón del flujo para los sólidos y para el gas, además de la distribución de presión en las inmediaciones de la burbuja. En la distribución de la presión alrededor de una burbuja, la presión justo en la zona inferior de la burbuja es la mínima presión alrededor de esta (Figura 17).



**Figura 17.** Representación de la distribución de la presión alrededor de una burbuja con el modelo de Davidson.  
Fuente: Kunii y Levenspiel (1991).



### 3.7. Caracterización de partículas

Debido a que no todas las partículas pueden ser fluidizadas, las características y propiedades que definen el comportamiento de estas, como el tamaño y la densidad, también influyen en el comportamiento del lecho. Geldart clasificó las partículas en cuatro grandes grupos dependiendo también de sus propiedades de fluidización en condiciones ambiente. Ordenadas de menor a mayor tamaño.

- Grupo C. Los materiales característicos de este grupo, son partículas cohesivas o polvos muy finos. Son partículas de un tamaño entre 20 y 30  $\mu m$ . En este tipo de sólidos, las fuerzas entre partículas son mayores comparadas con las fuerzas resultantes debido a la acción del gas, por lo que una fluidización normal resulta muy difícil. En lechos de un diámetro pequeño, tienden a ascender formando un tapón de sólidos, mientras que en lechos de mayor diámetro, se forman canales de sólidos sin fluidizar. Algunos ejemplos de este tipo de partículas son los polvos para la cara, la harina o el almidón.
- Grupo A. Está formado por sólidos aireables, o materiales con partículas pequeñas o con baja densidad ( $\lesssim 1400 \text{ kg/m}^3$ ). El tamaño característico de estas partículas está entre 20 y 100  $\mu m$ . Este tipo de sólidos, fluidizan fácilmente con velocidades pequeñas, lo que produce una fluidización suave. Cuando se supera la velocidad de mínima fluidización, el lecho se expande considerablemente antes de la aparición de burbujas. Cuando se supera la velocidad mínima de aparición de las burbujas, el lecho cambia a un modo burbujeante, caracterizado porque la velocidad de ascenso de las burbujas es mayor que la del gas. También se caracteriza porque estas burbujas parecen separarse y unirse frecuentemente en su ascenso a lo largo del lecho. Existe un tamaño máximo para las burbujas, normalmente menor que 10 cm, incluso en un lecho grande. Las partículas de este grupo se utilizan como catalizadores en reacciones de craqueo.
- Grupo B. Son partículas similares a la arena, es decir con un diámetro de partícula entre 40 y 500  $\mu m$  y una densidad entre 1400 y 4000  $\text{kg/m}^3$ . Estos sólidos, fluidizan bien y las burbujas aparecen en cuanto se supera la velocidad de mínima fluidización, estas burbujas crecen mucho y son muy enérgicas. A más altas velocidades, pequeñas burbujas se forman en el distribuidor, las cuales crecen y coalescen mientras ascienden a través del lecho. El tamaño de la burbuja, que es independiente del tamaño de las partículas sólidas, se incrementa linealmente con la distancia sobre el distribuidor y su velocidad de ascenso, supera la velocidad del gas.
- Grupo D. Pertenecen a este grupo las partículas grandes y/o densas. Este tipo de sólidos tienen un tamaño mayor que 600  $\mu m$ . Lechos profundos de estos sólidos, son difíciles de fluidizar y se comportan de forma errática. Pueden dar lugar a



burbujas que explotan, o formar grandes canales. Incluso si la distribución del gas es desigual, las partículas pueden salir del lecho en forma de chorro. Cuando se forman burbujas, estas se unen rápidamente y crecen hasta un tamaño grande. Estas mismas burbujas, ascienden con una velocidad menor que la del resto del gas. En lechos superficiales, se pueden dar lugar burbujas a una velocidad próxima a la de mínima fluidización. Los granos de café, guisantes, carbón gasificado, menas de metal asadas, son ejemplos característicos de este tipo de sólidos.

Esta clasificación hecha por Geldart (Figura 18), es clara y sencilla de usar para fluidizaciones con aire en condiciones ambientales, para velocidades menores que diez veces la velocidad de mínima fluidización.

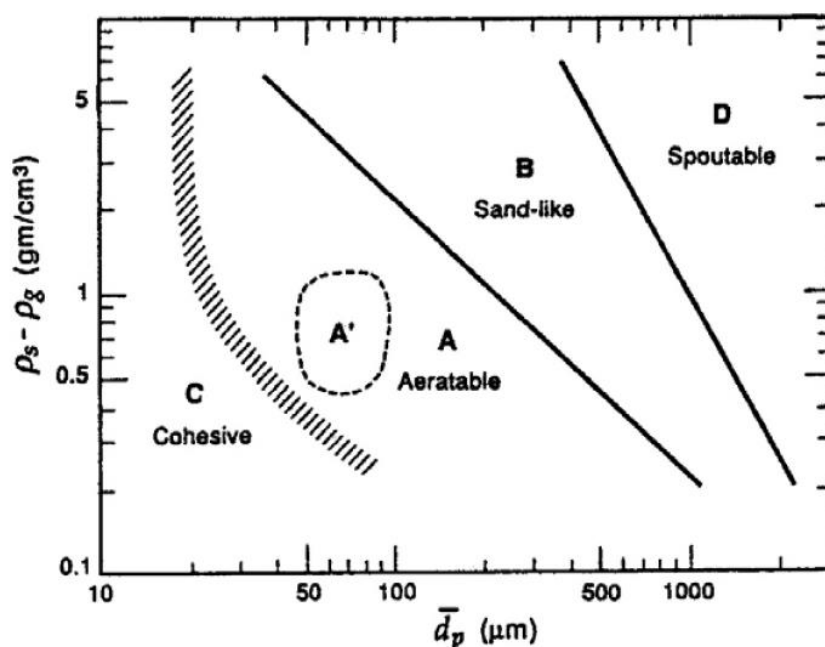


Figura 18. Clasificación de las partículas de Geldart. Fuente: Kunii y Levenspiel (1991).

### 3.8. Distribuidor y Plénium

En los lechos fluidizados reales, al contrario que en la mayoría de las simulaciones, el recipiente donde se produce la fluidización, tiene incorporado tanto el distribuidor como el plénium. Estos dos elementos no se suelen incluir en las fluidizaciones ideales y se supone una entrada de fluido directamente a la parte baja del lecho, mientras que en las fluidizaciones reales alteran el comportamiento del lecho, permitiendo simular unas condiciones más realistas de la entrada de aire en el lecho.

### 3.8.1. Plénium

El plénium es una especie de caja de aire, situada en la parte inferior del distribuidor, que contiene el aire presurizado que se utilizará en la fluidización. Existen varios diseños de plénium, con modelos tridimensionales y bidimensionales, incluso algunos modelos más simples de plénium (Figura 19).

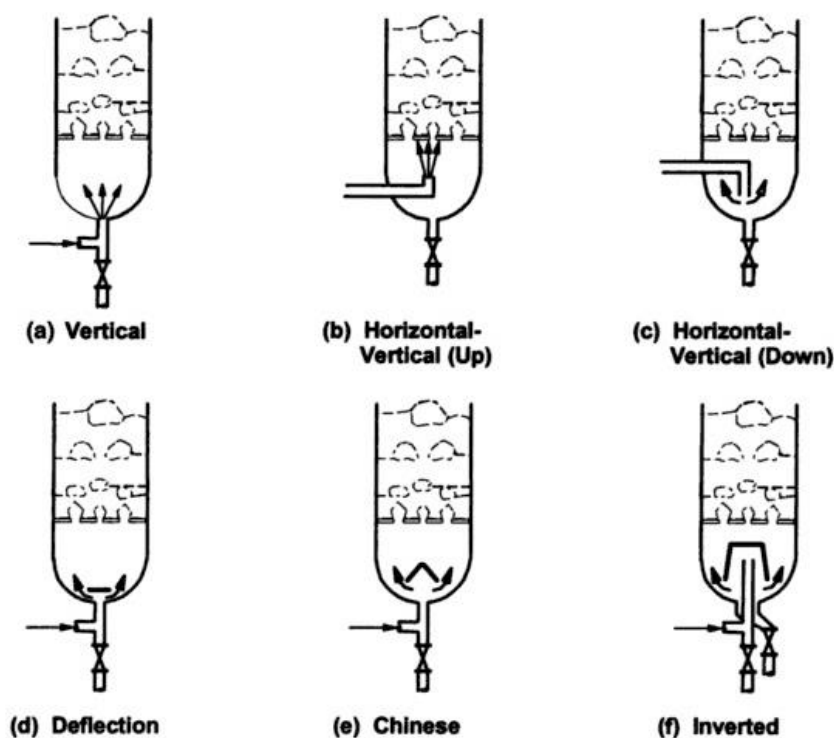
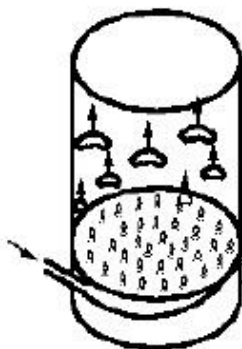


Figura 19. Modelos simples de plénium. Fuente: Yang (2003).

### 3.8.2. Distribuidor

El distribuidor es un componente importante de los lechos fluidizados, ya que se encarga de distribuir por igual la entrada de fluido al lecho (Figura 20). Debido a esto, inicia el contacto entre las partículas y el fluido de una forma efectiva.



**Figura 20.** Plato distribuidor. Fuente: Yang (2003).

La mayoría de estudios a pequeña escala, utilizan como distribuidor cerámica o platos de metal poroso, ya que tienen una alta resistencia al flujo para dar una distribución uniforme de gas. Aunque el contacto gas-sólido es superior con este tipo de distribuidor, para operaciones industriales tienen importantes inconvenientes. Estos pueden ser unos requerimientos más altos de potencia, un mayor coste de materiales, poca resistencia ante esfuerzos térmicos.

Debido a estas desventajas, en la industria se utilizan distribuidores de platos perforados o multiorificios, ya que son fáciles de fabricar y económicos. Un problema de este diseño, es la falta de rigidez, ya que se desvían bajo una carga pesada, por lo que necesitan de refuerzos. Además, durante las expansiones térmicas del gas, se pueden producir fugas. Cuando no es práctico tener una estructura de refuerzo para poder mantener el distribuidor recto, se pueden usar platos perforados curvos, ya que resisten cargas pesadas y esfuerzos térmicos.

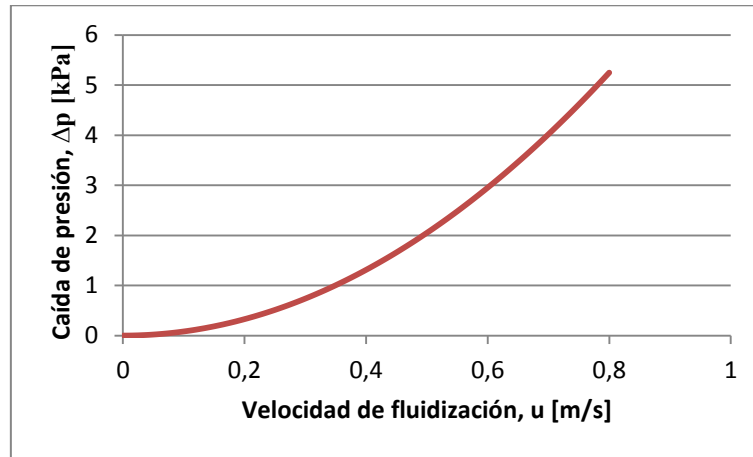
Debido a las características del distribuidor, el fluido que circula por él, solo tiene una componente en la dirección del movimiento, que es la componente normal al distribuidor.

#### 3.8.2.1. Diseño del distribuidor

La presencia del distribuidor en el diseño, conlleva una caída de presión debida a este elemento. Esta pérdida de carga, viene dada en función de la velocidad de fluidización mediante una expresión cuadrática. Donde  $C$  es una constante.

$$\Delta p = C \cdot u^2 \text{ [Pa]} \quad (3.26)$$

Un ejemplo de distribuidor, es un distribuidor con orificios perforado, para el cual, el valor de la constante es de 8200, obteniendo la curva representada en la Figura 21 (Sánchez-Delgado, 2010).



**Figura 21.** Caída de presión en el distribuidor en función de la velocidad de fluidización.

La ecuación de la caída de presión en el distribuidor, conduce a lechos bien distribuidos en cuanto al gas siempre que la caída de presión en el distribuidor es igual o mayor a la mitad de la que produce la columna de sólidos en reposo (Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos).

$$\Delta p_{dis} \geq \frac{1}{2} \sum_i \rho_i g H_0 \quad (3.27)$$

Este sumatorio incluye todas las fases presentes en la fluidización, tanto gas como sólidos, donde  $H_0$  es la altura del lecho en reposo. Sabiendo que la densidad del fluido es mucho menor que la densidad de los sólidos presentes en el lecho, la ecuación anterior se puede simplificar como la siguiente expresión.

$$\Delta p_{dis} \geq \frac{1}{2} \rho_s g H_0 \varepsilon_0 \quad (3.28)$$

Donde  $\varepsilon_0$  es la fracción de vacío del lecho de partículas sólidas en el estado de reposo, que es muy similar al estado de mínima fluidización.

### 3.9. Transferencia de calor

Los lechos fluidizados se encuentran en una gran variedad de operaciones térmicas, debido a las excelentes propiedades de transferencia de calor que poseen. Esta transferencia de calor no solo se produce desde las paredes al lecho, también desde superficies inmersas en el lecho, como pueden ser sistemas de tubos. Sin embargo, aún es muy difícil poder hallar el coeficiente de transferencia de calor con exactitud. Se han publicado correlaciones para estimar dicho coeficiente, pero están limitadas por las condiciones experimentales donde se han obtenido (Patil et al. 2006).

Una aproximación para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor,  $h$ , viene dada por la siguiente expresión.

$$h = \frac{\varepsilon k_g \left| \frac{\partial T_g}{\partial n} \right| + (1 - \varepsilon) k_s \left| \frac{\partial T_s}{\partial n} \right|}{|T_w - T_{bed}|} \quad (3.29)$$

Esta expresión depende de las temperaturas del lecho,  $T_{bed}$ , y de la pared,  $T_w$ , así como de las conductividades térmicas del gas,  $k_g$  y de los sólidos,  $k_s$ . En la ecuación (3.29) las derivadas de la temperatura se realizan con respecto a la coordenada espacial  $n$  cuya orientación está dada por el vector normal a la superficie de la pared con sentido hacia el lecho fluidizado.

En este proyecto, los cálculos realizados para obtener el coeficiente de transferencia de calor han sido muy laboriosos, puesto que se tuvieron que hallar las variaciones diferenciales de temperatura en cada celda de la pared, además de la fracción volumétrica asociada a la celda. Tal y como se indica en la ecuación (3.29) estos cálculos han de hacerse tanto para la fase gaseosa como para la fase sólida.

## 4. SIMULACIÓN DE LECHOS FLUIDIZADOS MEDIANTE TÉCNICAS CFD

Los principales modelos que se usan actualmente para las simulaciones de sistemas de flujo gas-sólido, se dividen en dos grupos, el modelo Lagrangiano-Euleriano y el modelo Euleriano-Euleriano.

El modelo Lagrangiano-Euleriano, describe las partículas individualmente usando la segunda ley de Newton, teniendo en cuenta las fuerzas de las colisiones entre partículas y las fuerzas de arrastre producidas por el fluido. La fase fluida se modela como un continuo mediante técnicas CFD Eulerianas. Este método resulta muy costoso computacionalmente.

El modelo Euleriano-Euleriano, también llamado TFM (Modelo de los Dos Fluidos, por sus siglas en inglés Two-Fluid Model), considera la fase sólida y la fase fluida como dos fluidos continuos interpenetrados. Esta formulación tiene en cuenta tanto la conservación de la masa como la conservación de momento para las dos fases presentes. Este modelo utiliza la teoría cinética del flujo granular (KTGF por sus siglas en inglés), que permite tener en cuenta el efecto de los distintos choques entre partículas, así como la interacción gas-partícula y el intercambio de momento con las paredes. Esta teoría, se basa en la teoría de los gases no uniformes. El modelo determina que tanto la viscosidad del fluido como la viscosidad del sólido son nulas. De esta manera, el comportamiento físico se puede determinar, ya que está dominado por las fuerzas de arrastre que existen entre la fase densa y la fase fluida, provocando la formación de burbujas, entre otros fenómenos. Para contrarrestar el efecto de la eliminación de la viscosidad en el modelo, se añadió un término viscoso sobre la fase densa. Para este término viscoso, aún no se han encontrado valores físicos realistas, como tampoco para la tensión en los sólidos. Esta aproximación se basa en la teoría cinética de las fases densas, en la que el concepto de temperatura usado en la termodinámica, se reemplaza por la temperatura de fluido granular o temperatura granular. Tanto la viscosidad de los sólidos, como la tensión en los sólidos, son función de esta temperatura granular, que varía con el tiempo y con la posición de la partícula en el lecho fluido.

Como cierre del modelo, son necesarias las ecuaciones constitutivas, que se usan para completar las relaciones que gobiernan la simulación.

El uso de este modelo Euleriano-Euleriano, que representa la fase sólida como un continuo con propiedades efectivas de fluido, tiene unos requerimientos computacionales menores que el Lagrangiano-Euleriano, por lo que es este modelo el que más se usa en la actualidad y el empleado en el presente proyecto. Por este motivo se describirán las ecuaciones del modelo Euleriano-Euleriano en el siguiente apartado.

#### 4.1. Ecuaciones del modelo computacional Euleriano-Euleriano.

Las ecuaciones mostradas a lo largo de este apartado se han obtenido de la ayuda tutorial de ANSYS Fluent (2014).

##### 4.1.1. Ecuaciones de conservación de masa

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\varepsilon_g \cdot \rho_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \cdot \rho_g \cdot \vec{v}_g) = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\varepsilon_s \cdot \rho_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \cdot \rho_s \cdot \vec{v}_s) = 0 \quad (4.2)$$

##### 4.1.2. Ecuación de conservación del momento en la fase gas

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\varepsilon_g \cdot \rho_g \cdot \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \cdot \rho_g \cdot \vec{v}_g^2) \\ = -\varepsilon_g \cdot \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_g + \varepsilon_g \cdot \rho_g \cdot \vec{g} - K_{gs} \cdot (\vec{v}_g - \vec{v}_s) \end{aligned} \quad (4.3)$$

##### 4.1.2.1. Coeficientes de intercambio de momento

- Función de arrastre de Gidaspow (1994)

$$K_{gs} = \frac{3}{4} \cdot c_D \cdot \frac{\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \cdot \varepsilon_g^{-2.65} \quad \text{Para } \varepsilon_g > 0.8 \quad (4.4)$$

$$K_{gs} = 150 \cdot \frac{\varepsilon_s^2 \mu_g}{\varepsilon_g d_s^2} + 1.75 \cdot \frac{\varepsilon_s \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \quad \text{Para } \varepsilon_g \leq 0.8 \quad (4.5)$$

Donde

$$c_D = \frac{24}{\varepsilon_g Re_s} \cdot \left[ 1 + 0.15 (\varepsilon_g Re_s)^{0.687} \right] \quad (4.6)$$

Y

$$Re_s = \frac{\rho_g \varepsilon_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{\mu_g} \quad (4.7)$$

- Función de arrastre de Syamlal-O'Brien (1989)

$$K_{gs} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g}{v_{r,s}^2 d_s} \cdot c_D \cdot \left( \frac{Re_s}{v_{r,s}} \right) \cdot |\vec{v}_s - \vec{v}_g| \quad (4.8)$$

Donde

$$c_D = \left( 0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_s / v_{r,s}}} \right)^2 \quad (4.9)$$

Y

$$v_{r,s} = 0.5 \left( A - 0.06 Re_s + \sqrt{(0.06 Re_s)^2 + 0.12 Re_s \cdot (2B - A) + A^2} \right) \quad (4.10)$$

Con

$$A = \varepsilon_g^{4.14}, \quad B = 0.8 \varepsilon_g^{1.28} \quad \text{Para } \varepsilon_g \leq 0.85 \quad (4.11)$$

$$A = \varepsilon_g^{4.14}, \quad B = \varepsilon_g^{2.65} \quad \text{Para } \varepsilon_g > 0.85 \quad (4.12)$$

#### 4.1.3. Ecuación de conservación de momento en la fase sólida

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\varepsilon_s \cdot \rho_s \cdot \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \cdot \rho_s \cdot \vec{v}_s^2) \\ = -\varepsilon_s \cdot \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \vec{\tau}_s + \varepsilon_s \cdot \rho_s \cdot \vec{g} + K_{gs} \cdot (\vec{v}_g - \vec{v}_s) \end{aligned} \quad (4.13)$$

##### 4.1.3.1. Ecuaciones constitutivas

- Tensor de tensiones de la fase sólida

$$\vec{\tau}_s = \varepsilon_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \varepsilon_s \left( \lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \cdot \nabla \cdot \vec{v}_s \vec{I} \quad (4.14)$$

- Función de distribución radial

$$g_{0,ss} = \left[ 1 - \left( \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (4.15)$$

- Ecuación de la temperatura granular



De una forma similar al concepto de temperatura en gases empleado en la termodinámica clásica, se puede definir la temperatura granular como una medida de la energía de las fluctuaciones de las partículas sólidas. Quedando definida por la siguiente expresión.

$$\Theta_s = \frac{1}{3} v'^2 \quad (4.16)$$

Donde  $\Theta_s$  es la temperatura granular de las partículas y  $v'$  su velocidad de fluctuación.

- Coeficiente de difusión de temperatura granular de Syamlal-O'Brien (1989)

$$k_{\Theta s} = \frac{15 \cdot d_s \cdot \rho_s \cdot \varepsilon_s \cdot \sqrt{\Theta_s \cdot \pi}}{4 \cdot (41 - 33 \cdot \eta)} \cdot \left[ 1 + \frac{12}{5} \cdot \eta^2 \cdot (4 \cdot \eta - 3) \cdot \varepsilon_s \cdot g_{0,ss} + \frac{16}{15\pi} (41 - 33 \cdot \eta) \cdot \eta \cdot \varepsilon_s g_{0,ss} \right] \quad (4.17)$$

Donde

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot (1 + e_{ss}) \quad (4.18)$$

- Coeficiente de difusión de temperatura granular de Gidaspow (1994)

$$k_{\Theta s} = \frac{150 \cdot \rho_s \cdot d_s \cdot \sqrt{\Theta_s \cdot \pi}}{384 \cdot (1 + e_{ss}) \cdot g_{0,ss}} \left[ 1 + \frac{6}{5} \cdot \varepsilon_s \cdot g_{0,ss} \cdot (1 + e_{ss}) \right]^2 + 2 \cdot \rho_s \cdot d_s \cdot \varepsilon_s^2 \cdot g_{0,ss} \cdot (1 + e_{ss}) \cdot \sqrt{\frac{\Theta_s}{\pi}} \quad (4.19)$$

- Disipación de energía por colisiones

$$\gamma_{\Theta m} = \frac{12 \cdot (1 - e_{ss}^2) \cdot g_{0,ss}}{d_s \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \rho_s \varepsilon_s^2 \cdot \Theta_s^{3/2} \quad (4.20)$$

- Transferencia de energía cinética

$$\phi_{gs} = -3 \cdot K_{gs} \cdot \Theta_s \quad (4.21)$$

- Presión de la fase sólida

$$p_s = \varepsilon_s \cdot \rho_s \cdot \Theta_s + 2 \cdot \rho_s \cdot (1 + e_{ss}) \cdot \varepsilon_s^2 \cdot g_{0,ss} \cdot \Theta_s \quad (4.22)$$

- Viscosidad cortante de la fase sólida

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (4.23)$$

- Viscosidad de la fase sólida por colisiones

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \cdot \varepsilon_s \cdot \rho_s \cdot d_s \cdot g_{0,ss} \cdot (1 + e_{ss}) \cdot \left(\frac{\Theta_s}{\pi}\right)^{1/2} \quad (4.24)$$

- Viscosidad de la fase sólida por fricción

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \cdot \sin \phi}{2 \cdot \sqrt{I_{2D}}} \quad (4.25)$$

- Viscosidad cinética de Syamlal-O'Brien (Syamlal y O'Brien, 1989)

$$\mu_{s,kin} = \frac{\varepsilon_s \cdot d_s \cdot \rho_s \cdot \sqrt{\Theta_s \cdot \pi}}{6(3 - e_{ss})} \cdot \left[1 + \frac{2}{5} \cdot (1 + e_{ss}) \cdot (3 \cdot e_{ss} - 1) \cdot \varepsilon_s \cdot g_{0,ss}\right] \quad (4.26)$$

- Viscosidad cinética de Gidaspow (Gidaspow, 2004)

$$\mu_{s,kin} = \frac{10 \cdot \rho_s \cdot d_s \cdot \sqrt{\Theta_s \cdot \pi}}{96 \cdot \varepsilon_s \cdot (1 + e_{ss}) \cdot g_{0,ss}} \cdot \left[1 + \frac{4}{5} \cdot g_{0,ss} \cdot \varepsilon_s \cdot (1 + e_{ss})\right]^2 \quad (4.27)$$

- Viscosidad volumétrica

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \cdot \varepsilon_s \cdot d_s \cdot \rho_s \cdot g_{0,ss} \cdot (1 + e_{ss}) \cdot \left(\frac{\Theta_s}{\pi}\right)^{1/2} \quad (4.28)$$

#### 4.1.4. Balances de energía térmica

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g H_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g H_g) = \nabla \cdot \varepsilon_g k_g \nabla T_g - \alpha(T_g - T_s) \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_s \rho_s H_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s H_s) = \nabla \cdot \varepsilon_s k_s \nabla T_s + \alpha(T_g - T_s) \quad (4.30)$$

#### 4.1.5. Fluctuación energética de conservación de las partículas sólidas

Esta ecuación describe el trabajo realizado por la fuerza de las fluctuaciones en los desplazamientos de partículas al azar en una unidad de volumen durante una unidad de tiempo.

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} \cdot \left[ \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho_s \cdot \varepsilon_s \cdot \Theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \cdot \varepsilon_s \cdot \vec{v}_s \cdot \Theta_s) \right] \\ & = (-p_s \vec{I} + \vec{\tau}_s) : \nabla \cdot \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\Theta s} \cdot \nabla \cdot \Theta_s) - \gamma_{\Theta s} \end{aligned} \quad (4.31)$$

#### 4.1.6. Coeficiente de transferencia de calor en la interacción gas-sólidos

Correlación obtenida por Gunn (1978).

$$\alpha = \frac{6\varepsilon_s}{d_p} \alpha_s \quad (4.32)$$

$$Nu_s = (7 - 10\varepsilon_g + 5\varepsilon_g^2) [1 + 0.7(Re_s)^{0.2}(Pr)^{1/3}] + (1.33 - 2.40\varepsilon_g + 1.20\varepsilon_g^2)(Re_s)^{0.2}(Pr)^{1/3} \quad (4.33)$$

Donde

$$Nu_s = \frac{\alpha_s d_p}{k_g} \quad (4.34)$$

$$Re_s = \frac{\varepsilon_s \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{\mu_g} \quad (4.35)$$

$$Pr = \frac{\mu_g C_{p_g}}{k_g} \quad (4.36)$$

#### 4.1.7. Ecuación gases ideales

$$\rho_g = \frac{p}{\frac{R}{M} T} \quad (4.37)$$



## 5. MODELOS COMPUTACIONALES UTILIZADOS EN EL PROYECTO

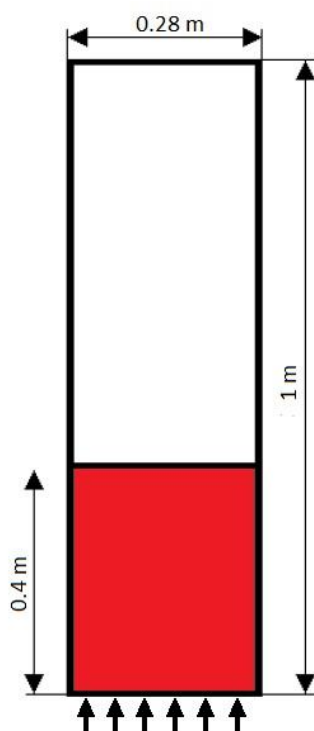
En este apartado se van a explicar y a desarrollar los distintos casos estudiados, así como las características y las condiciones de cada uno. Tanto para el desarrollo de la geometría y de la malla usada en cada caso se ha usado el paquete de software ANSYS, utilizando el programa adecuado en las tareas correspondientes. Se han creado distintos tipos de geometría y de malla para cada uno de los casos.

### 5.1. Desarrollo y comparación con un lecho fluidizado ya estudiado.

El objetivo de este apartado es el de aprendizaje del software en el estudio de lechos fluidizados, saber cómo utilizar las distintas opciones que ofrece este y comparar los resultados obtenidos con los de un lecho fluidizado estudiado en el artículo de Taghipour, para así poder validarlos. Este estudio preliminar, sirve además como base para poder desarrollar los demás casos con una formulación y con un paso de tiempo adecuados para obtener una solución.

#### 5.1.1. Modelo físico y dominio computacional

Tomando como referencia el caso estudiado en el experimento realizado por el Departamento de Ingeniería Química y Biológica de la Universidad de British Columbia, se ha desarrollado el mismo dominio computacional para la simulación. Una columna bidimensional de 1 m de altura y de ancho 0.28 m, teniendo la fase densa en el estado de reposo una altura inicial de 0.4 m, como se muestra en la Figura 22 de forma esquemática. La entrada de aire, como se puede ver en la figura, se realiza por la parte inferior de la columna, siendo una entrada uniforme y constante.



**Figura 22.** Esquema de la instalación seguida para la comparación del estudio computacional de un lecho fluidizado.

En este caso se han utilizado como partículas para la fase densa, esferas de vidrio de  $275\ \mu\text{m}$  de diámetro,  $d_p$ , y de densidad  $2500\ \text{kg/m}^3$ , estas partículas están en el lecho con una fracción volumétrica inicial,  $\epsilon$ , 0.6. Ya que la fluidización se lleva a cabo en condiciones ambientales, la fase fluida utilizada ha sido aire atmosférico con una densidad de  $1.225\ \text{kg/m}^3$ .

Se resumen todas las características utilizadas para la simulación de este primer bloque de casos en la Tabla 2.

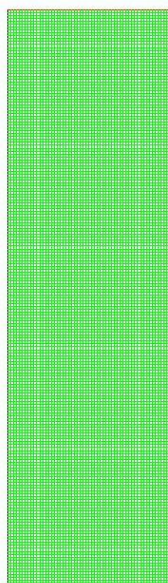
Característica	Valor
Densidad de las partículas de vidrio	$2500\ \text{kg/m}^3$
Densidad del gas (aire)	$1.225\ \text{kg/m}^3$
Diámetro medio de partícula, $d_p$	$275\ \mu\text{m}$
Coefficiente de restitución, $e_{ss}$	0.9
Fracción volumétrica inicial de sólidos	0.6
Ancho de la columna	0.28 m
Altura de la columna	1 m
Altura del lecho inicial de sólidos	0.4 m
Tamaño de la celda de malla	$5 \cdot 10^{-3}\ \text{m}$
Condición de contorno de entrada	Velocity
Condición de contorno de salida	Outflow

**Tabla 2.** Resumen del dominio computacional del Bloque 1.

### 5.1.2. Mallado del dominio computacional

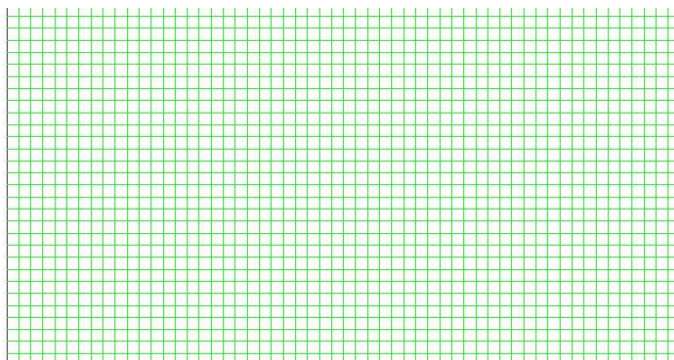
Toda la creación de la geometría y del mallado de esta, se ha realizado mediante los programas correspondientes incluidos en el paquete ANSYS, Desing Modeler y Meshing, respectivamente. Para este primer bloque de casos, se ha seguido el tamaño de celda indicado por el artículo de Taghipour y colaboradores (2005),  $5 \cdot 10^{-3}$  m.

Como se puede apreciar en la Figura 23, la malla es uniforme, se ha mantenido el tamaño de celda para toda la columna, obteniendo una malla con 11180 nodos.



**Figura 23.** Malla computacional utilizada para el estudio del lecho fluidizado.

Se representa un detalle de la zona inferior de la malla, donde se pueden apreciar mejor las celdas presentes en el mallado (Figura 24).



**Figura 24.** Detalle de las celdas de la malla computacional.

Como comprobación previa de la estabilidad de la malla durante la simulación, se habría podido aplicar el criterio CFL, este criterio implica que existe un valor máximo, que no se debe superar para que asegure la estabilidad del modelo.

$$CFL < CFL_{max} \quad \text{Siendo} \quad CFL = \frac{\Delta t \cdot v}{\Delta z} \quad (5.1)$$

Siendo  $\Delta t$ , el paso de tiempo utilizado en la simulación,  $v$ , la velocidad de entrada del fluido y  $\Delta z$ , la altura de la celda. El número de Courant obtenido en este caso es 0.038, un valor muy pequeño. A pesar de haber hallado el valor CFL de la malla utilizada en este bloque de simulaciones, no se ha podido encontrar el valor máximo utilizado por ANSYS Fluent, que asegure la estabilidad del sistema. Por esta razón, se ha obviado utilizarlo de nuevo en los diferentes bloques.

### 5.1.3. Descripción de los casos

Con el estudio de este bloque se pretende estudiar cual es el grado de influencia de la formulación utilizada en los resultados obtenidos en la simulación. Además del tipo de formulación, también se ha variado la velocidad de fluidización y el paso de tiempo entre las iteraciones.

Para evaluar cómo influyen estos parámetros, se obtendrán entre otros resultados, perfiles con las velocidades de las partículas sólidas, perfiles de fracción volumétrica, el grado de expansión del lecho, la caída de presión en el lecho, de esta manera y con estos resultados, se comparará con los obtenidos en la simulación realizada por la Universidad de British Columbia, detallados en el artículo.

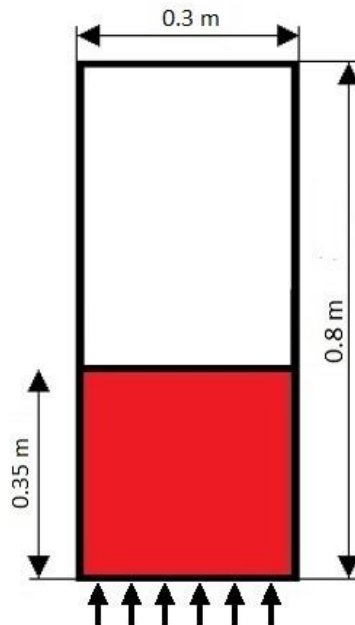
## 5.2. Incorporación de la compresibilidad del gas

El objetivo de este apartado es el de estudiar cómo afecta la compresibilidad del gas en un lecho fluidizado. Para ello, se va a proceder a la simulación de distintos casos de lechos fluidizados, todos con las mismas características, tipo y tamaño de partículas, así como la vasija donde se realiza la simulación. La influencia de la compresibilidad se verá mediante la comparación con un caso similar en el que el gas sea incompresible.

### 5.2.1. Modelo físico y dominio computacional

Tomando como referencia el bloque anterior, se ha diseñado un dominio similar para la simulación. Una columna bidimensional de 0.8 m de altura y 0.3 m de ancho (Figura

25). Al igual que en el bloque anterior, la entrada de aire se realiza por la parte inferior de la columna, por lo que sigue siendo una entrada de aire constante y uniforme. En este caso la altura inicial de la fase densa es de 0.35 m. En este bloque, las partículas sólidas tienen un diámetro de 280  $\mu\text{m}$ , añadiendo el calor específico y la conductividad térmica de las partículas para el caso con aire compresible, cuyos valores son de 737 J/Kg·K y de 1 W/K·m, respectivamente.



**Figura 25.** Esquema de la instalación utilizada en la simulación computacional de los Casos 5 y 6.

En la Tabla 3 se resumen todas las características utilizadas para la simulación de este bloque de casos.

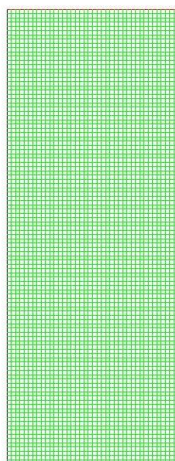
Característica	Valor
Densidad de las partículas de vidrio	2600 kg/m <sup>3</sup>
Densidad del gas incompresible (aire)	1.225 kg/m <sup>3</sup>
Calor específico de las partículas	737 J/Kg·K
Conductividad térmica de las partículas	1 W/K·m
Diámetro medio de partícula, $d_p$	280 $\mu\text{m}$
Coefficiente de restitución, $e_{ss}$	0.9
Fracción volumétrica inicial de sólidos	0.6
Ancho de la columna	0.3 m
Altura de la columna	0.8 m
Altura del lecho inicial de sólidos	0.35 m
Tamaño de la celda de malla	7.5·10 <sup>-3</sup> m
Condición de contorno de entrada	Velocity
Condición de contorno de salida	Pressure Outlet

**Tabla 2.** Resumen del dominio computacional del Bloque 2.



### 5.2.2. Mallado del dominio computacional

Al igual que en el bloque anterior, la geometría y la malla computacional de este bloque de casos se han creado mediante los programas correspondientes del paquete ANSYS. El tamaño de celda utilizado es de  $7.5 \cdot 10^{-3}$  m (Figura 26). Se ha escogido este tamaño de celda debido a que se utilizará en los siguientes bloques y es el utilizado por Patil y colaboradores (2006) en su artículo, usando el mismo tamaño de partícula. Para una discusión más detallada sobre la idoneidad del tamaño de la malla se remite a su artículo (Patil et al., 2006).



**Figura 26.** Malla computacional utilizada para el estudio del lecho fluidizado, Casos 6 y 7.

### 5.2.3. Descripción de los casos

En este bloque se pretende estudiar la influencia de la incompresibilidad del gas en un lecho fluidizado. Utilizando la formulación escogida en el anterior bloque, se hará una comparación directa entre un caso con gas compresible y otro con gas incompresible, ambos con las mismas características. Para ello se utilizarán perfiles de resultados como en el bloque anterior, además de que se realizarán mapeos de los datos de todo el recipiente, para obtener un mayor número de resultados.

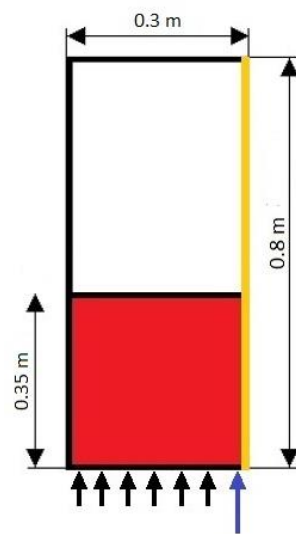
## 5.3. Incorporación de la transferencia de calor al lecho

El objetivo de este bloque es el estudio de cómo afecta la compresibilidad del fluido a un lecho fluidizado con transferencia de calor desde una de las paredes y con una inyección intermitente de aire en forma de jet. Este jet tiene una frecuencia de activación de 0.25 segundos. También, se hará una simulación en la que se incluirá la interacción térmica entre el aire y las partículas. Primero, se simulará el caso con aire incompresible, para

posteriormente hacer una comparación con los casos con aire compresible. La influencia de la compresibilidad del gas, se estudiará mediante la comparación de las simulaciones.

### 5.3.1. Modelo físico y dominio computacional

A partir del bloque anterior, se ha diseñado un dominio similar. Una columna bidimensional similar, añadiendo una entrada de 0.015 m para la inyección de aire en forma de jet (Figura 27). La pared a través de la cual se hará la transferencia de calor será una pared lateral de la vasija. En este apartado se tomarán unos valores similares al apartado anterior para las propiedades físicas de las partículas.



**Figura 27.** Esquema de la instalación utilizada en la simulación computacional de los Casos 8, 9 y 10.

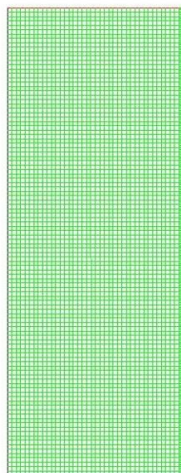
Se resumen todas las características utilizadas para la simulación de este bloque de casos en la Tabla 4.

Característica	Valor
Densidad de las partículas de vidrio	2600 kg/m <sup>3</sup>
Densidad del gas incompresible (aire)	1.225 kg/m <sup>3</sup>
Calor específico de las partículas	737 J/Kg·K
Conductividad térmica de las partículas	1 W/K·m
Diámetro medio de partícula, $d_p$	280 $\mu$ m
Coefficiente de restitución, $e_{ss}$	0.9
Fracción volumétrica inicial de sólidos	0.6
Ancho de la columna	0.3 m
Altura de la columna	0.8 m
Altura del lecho inicial de sólidos	0.35 m
Tamaño de la celda de malla	$7.5 \cdot 10^{-3}$ m
Condición de contorno de entrada	Velocity
Condición de contorno de salida	Pressure Outlet

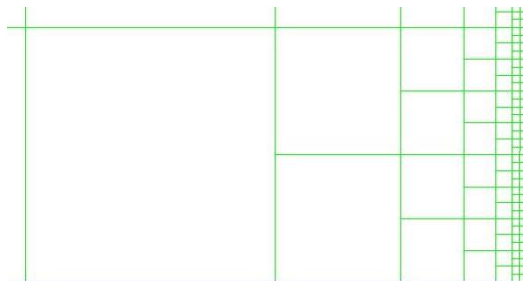
**Tabla 4.** Resumen del dominio computacional del Bloque 3.

### 5.3.2. Mallado del dominio computacional

La geometría utilizada en este bloque, es similar a la utilizada en el bloque anterior. Sin embargo la malla utilizada, se refina el tamaño de celda, según se va acercando a la pared, al igual que se hace en el artículo seguido (Patil et al., 2006). Este refinamiento se hace 5 veces hasta un tamaño de celda aproximado de  $2.3 \cdot 10^{-4}$  m (Figuras 28 y 29).



**Figura 28.** Malla computacional utilizada para el estudio del lecho fluidizado, Casos 8, 9 y 10.



**Figura 29.** Detalle de las celdas de la malla computacional.

### 5.3.3. Descripción de los casos

Utilizando la formulación y la geometría escogidas en los bloques anteriores, se hará una comparación directa entre los casos con gas compresible y el caso con gas incompresible, con las mismas características. Además de comprobar la influencia de la compresibilidad del gas en el mecanismo de la transferencia de calor, se estudiará la influencia de la interacción entre el fluido y las partículas y su efecto sobre el coeficiente de transferencia de calor. Para ello, al igual que en los casos anteriores, se utilizarán perfiles de resultados, además de realizar un mapeo de los datos en el recipiente.



#### 5.4. Lecho burbujeante con transferencia de calor

El objetivo de este apartado es el estudio de la influencia de la compresibilidad del aire sobre la transferencia de calor a un lecho burbujeante. Al igual que en el bloque anterior, la transferencia de calor se simulará a través de una pared caliente al lecho, además de una inyección intermitente de aire en forma de jet con una frecuencia de 0.25 segundos. La influencia de la compresibilidad del gas, se estudiará mediante la comparación con un lecho con las mismas características en el que el gas sea incompresible.

##### 5.4.1. Modelo físico y dominio computacional

Se utilizará el mismo modelo diseñado para el bloque anterior, una columna bidimensional con la misma altura, el mismo ancho, la entrada de aire se ha mantenido en la parte inferior del lecho, al igual que la entrada para la inyección de aire. En este apartado se tomarán unos valores similares al apartado anterior para las propiedades físicas de las partículas.

En la Tabla 5 se resumen todas las características utilizadas para la simulación de este bloque de casos.

Característica	Valor
Densidad de las partículas de vidrio	2600 kg/m <sup>3</sup>
Densidad del gas incompresible (aire)	1.225 kg/m <sup>3</sup>
Calor específico de las partículas	737 J/Kg·K
Conductividad térmica de las partículas	1 W/K·m
Diámetro medio de partícula, $d_p$	280 $\mu$ m
Coefficiente de restitución, $e_{ss}$	0.9
Fracción volumétrica inicial de sólidos	0.6
Ancho de la columna	0.3 m
Altura de la columna	0.8 m
Altura del lecho inicial de sólidos	0.35 m
Tamaño de la celda de malla	7.5·10 <sup>-3</sup> m
Condición de contorno de entrada	Velocity
Condición de contorno de salida	Pressure Outlet

**Tabla 5.** Resumen del dominio computacional del Bloque 4.

##### 5.4.2. Mallado del dominio computacional

La geometría y el mallado utilizados en este bloque, son similares a los utilizados en el bloque anterior, incluyendo el refinamiento de la malla en las inmediaciones de la pared con mayor temperatura.

### 5.4.3. Descripción de los casos

Al igual que en el bloque anterior, se analizará la transferencia de calor desde la pared al lecho y la influencia que tiene la compresibilidad del aire en el mecanismo de transferencia de calor. De forma similar, se estudiará la interacción térmica entre las partículas y el aire y cómo interviene en el coeficiente de transferencia de calor. Para ello, al igual que en los bloques anteriores, se utilizarán perfiles de resultados, además de realizar un mapeo de los datos en el recipiente.

### 5.5. Resumen de los casos

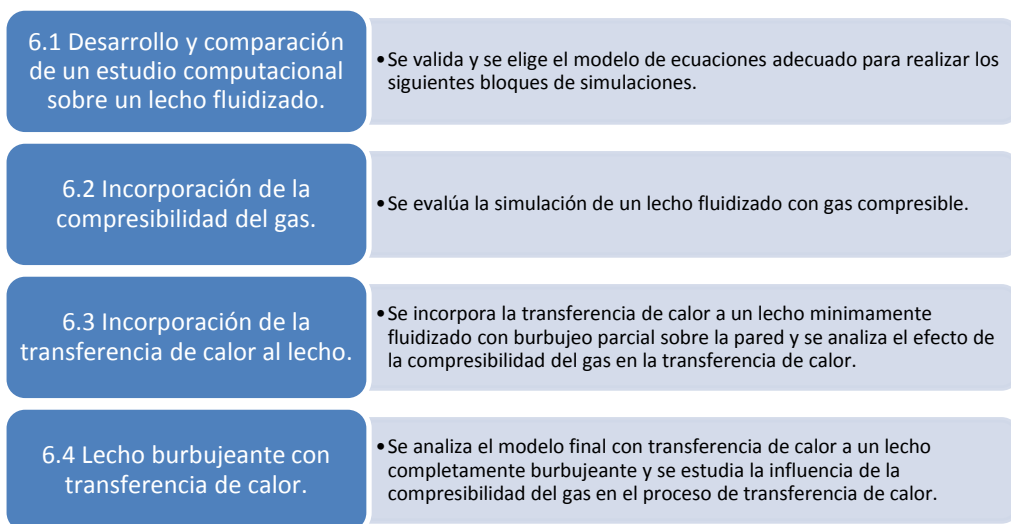
En la siguiente tabla (Tabla 6) se muestran los casos simulados, con una breve descripción para facilitar su reconocimiento. En esta tabla se diferencian los distintos modelos de formulación de ecuaciones constitutivas utilizados, la velocidad de fluidización, así como la velocidad del jet de aire, en caso de haberlo. También se incluye el paso de tiempo seguido en las diferentes simulaciones y el tiempo total simulado.

Bloque	Caso	Formulación	U (m/s)	U <sub>jet</sub> (m/s)	Paso de tiempo (s)	Tiempo simulación (s)
1	1	Syamlal-O'Brien	0.38	-	0.001	10
	2	Gidaspow	0.38	-	0.001	10
	3	Syamlal-O'Brien	0.38	-	0.0005	10
	4	Syamlal-O'Brien	0.46	-	0.001	10
	5	Syamlal-O'Brien	0.19	-	0.001	10
2	6	Gidaspow	0.5	-	0.0005	10
	7	Gidaspow	0.5	-	0.0005	10
3	8	Gidaspow	0.08	5	0.00025	3
	9	Gidaspow	0.08	5	0.00025	3
	10	Gidaspow	0.08	5	0.00025	3
4	11	Gidaspow	0.5	5	0.00025	3
	12	Gidaspow	0.5	5	0.00025	3
	13	Gidaspow	0.5	5	0.00025	3

**Tabla 6.** Resumen de los casos estudiados.

## 6. RESULTADOS

Los resultados que se presentan en este tema, se estructuran siguiendo la secuencia descrita a continuación.



### 6.1. Desarrollo y comparación de un estudio computacional sobre un lecho fluidizado

En la Tabla 7 se resume la información de los distintos casos estudiados en este bloque de resultados, como se ha descrito en el apartado 5.1.

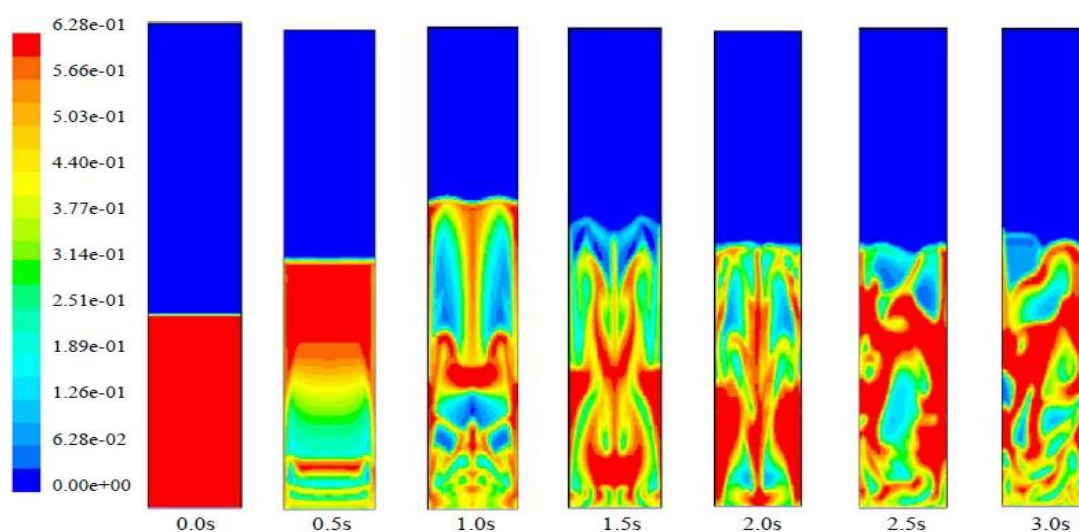
Caso	Formulación	Paso de tiempo (s)	U (m/s)	Tiempo de simulación (s)
1	Syamlal-O'Brien	0.001	0.38	10
2	Gidaspow	0.001	0.38	10
3	Syamlal-O'Brien	0.0005	0.38	10
4	Syamlal-O'Brien	0.001	0.46	10
5	Syamlal-O'Brien	0.001	0.19	10

**Tabla 7.** Resumen de los casos del Bloque 1.

Tras haber realizado los estudios computacionales y aun habiendo utilizado los mismos modelos de simulación, se han encontrado diferencias entre los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en este proyecto y los experimentos realizados por la Universidad de British Columbia. Con el objetivo de buscar una explicación se van a comparar perfiles de presión, velocidad y fracción volumétrica de cada uno de los modelos empleados. En los resultados que incluyan valores medios, se tomará como valor adecuado el valor medio entre 5 y 10 segundos, ya que el inicio de la fluidización podría falsear los resultados.

#### 6.1.1. Mapas de fracción volumétrica de la fase sólida

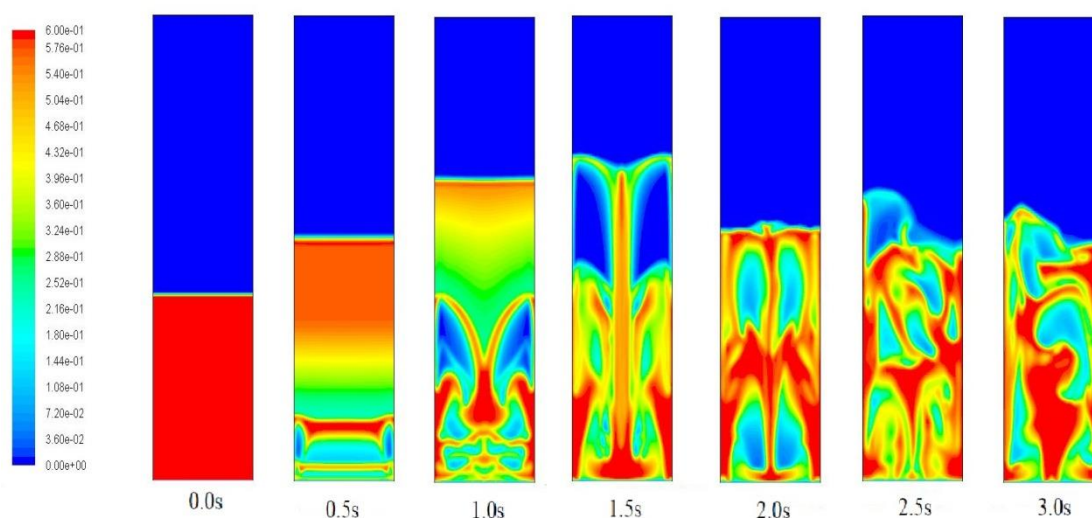
Se va a proceder a comparar los mapas de la fracción volumétrica de la fase sólida de la simulación realizada con los expuestos en el artículo. En primer lugar, se muestra la evolución del lecho desde el momento inicial de reposo hasta que han transcurrido 3 segundos, en intervalos de tiempo de 0.5 segundos (Figura 30). Se indica también, el valor de la fracción volumétrica correspondiente al color representado.



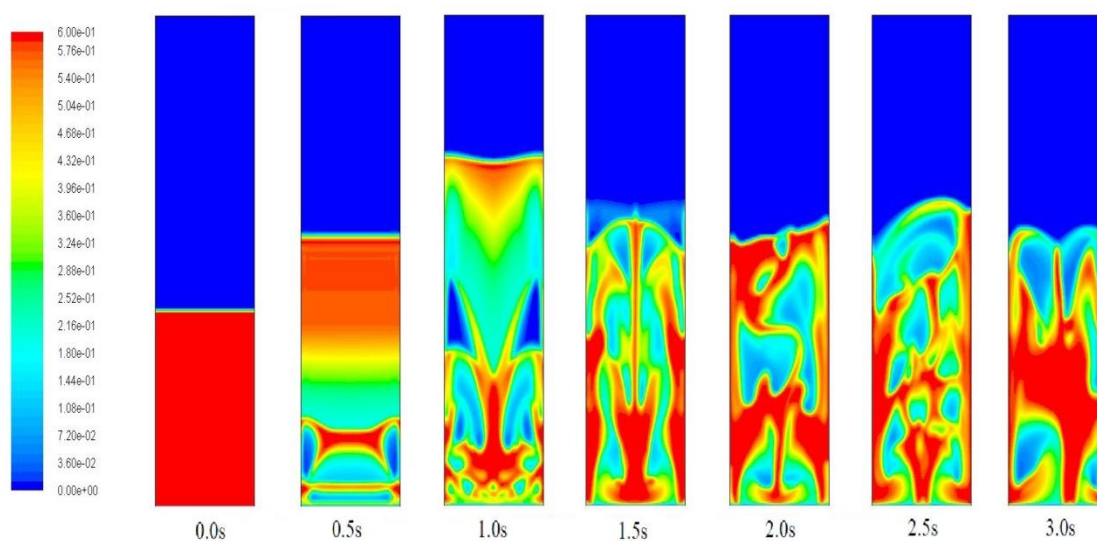
**Figura 30.** Mapas de fracción volumétrica obtenidos por la U.B.C. (Modelo: Syamlal-O'Brien;  $U=0.38\text{m/s}$ ). Fuente: Taghipour et al. (2005).

Observando el desarrollo del lecho, se puede apreciar como la simetría se mantiene durante más de 2 segundos, momento en el que el lecho se empieza a convertir en un lecho burbujeante. También se puede apreciar cómo se alcanza el máximo grado de expansión en un principio, pero al desarrollarse las burbujas desciende hasta la altura del lecho en fluidización.

A continuación, se muestran los mapas de los casos 1, 2 y 3 (Figuras 31, 32 y 33). Con estos resultados se podrá evaluar la influencia en el estudio del paso del tiempo en la simulación, los Casos 1 y 2, con un paso de tiempo correspondiente a  $10^{-3}$ s, mientras que el Caso 3, con un paso de tiempo de  $5 \cdot 10^{-3}$ s. También se podrá observar la influencia en la simulación de la formulación de ecuaciones utilizada en cada caso, correspondiendo la de los Casos 1 y 3 al modelo de ecuaciones de Syamlal-O'Brien, mientras que el modelo de ecuaciones de Gidaspow corresponde al Caso 2.

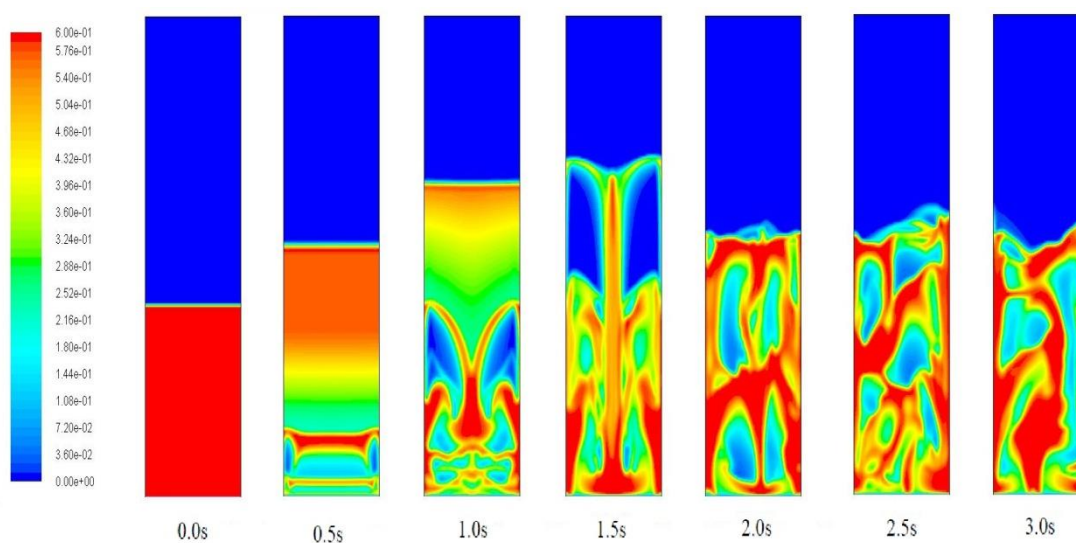


**Figura 31.** Mapas de fracción volumétrica del Caso 1 (Modelo: Syamlal-O'Brien;  $U=0.38\text{m/s}$ ; Paso de tiempo= $0.001\text{s}$ ).



**Figura 32.** Mapas de fracción volumétrica del Caso 2 (Modelo: Gidaspow;  $U=0.38\text{m/s}$ ; Paso de tiempo= $0.001\text{s}$ ).





**Figura 33.** Mapas de fracción volumétrica del Caso 3 (Modelo: Syamlal-O'Brien;  $U=0,38\text{m/s}$ ; Paso de tiempo= $0.0005\text{s}$ ).

Como se aprecia en las tres imágenes, los resultados obtenidos en los mapas de fracción volumétrica de sólidos, difieren entre sí, dependiendo del modelo de formulación utilizada y del paso de tiempo de cada simulación.

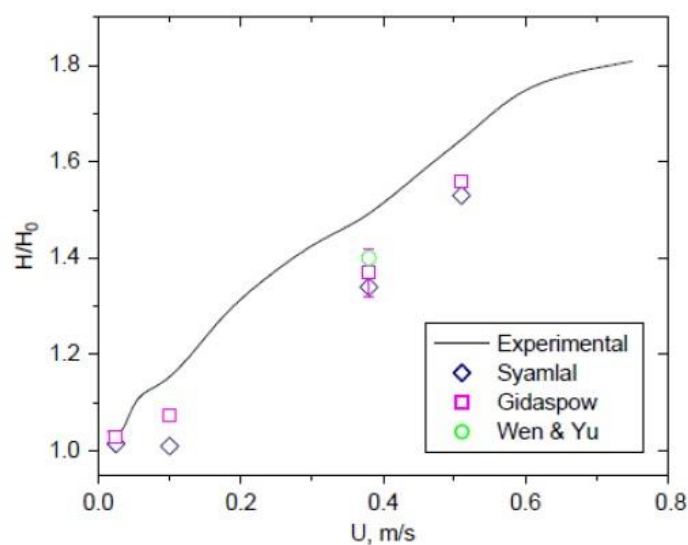
Según se observa de los mapas del Caso 2 (formulación Gidaspow) (Figura 32), la simetría se rompe antes que en los otros casos. Se puede apreciar que en el instante de 1.5 segundos, el lecho ya está descendiendo a la altura de fluidización, mientras que en los casos con formulación de Syamlal-O'Brien, aún se mantiene la máxima expansión del lecho.

Con respecto a la diferencia entre los distintos pasos de tiempo, se observa que el perfil no varía mucho entre el Caso 1 y el Caso 3 (Figuras 31 y 33). De esto se deduce que en este tipo de simulación el paso de tiempo empleado no influye en la fluidización del lecho.

#### 6.1.2. Grado de expansión del lecho fluidizado

Para poder evaluar correctamente los modelos de ecuaciones utilizados y obtener una información más ajustada del comportamiento del lecho fluidizado, se ha obtenido el grado de expansión del lecho fluido comparado con el estado de reposo ( $H_0$ ) para cada una de las velocidades de inyección del aire utilizadas en las simulaciones.

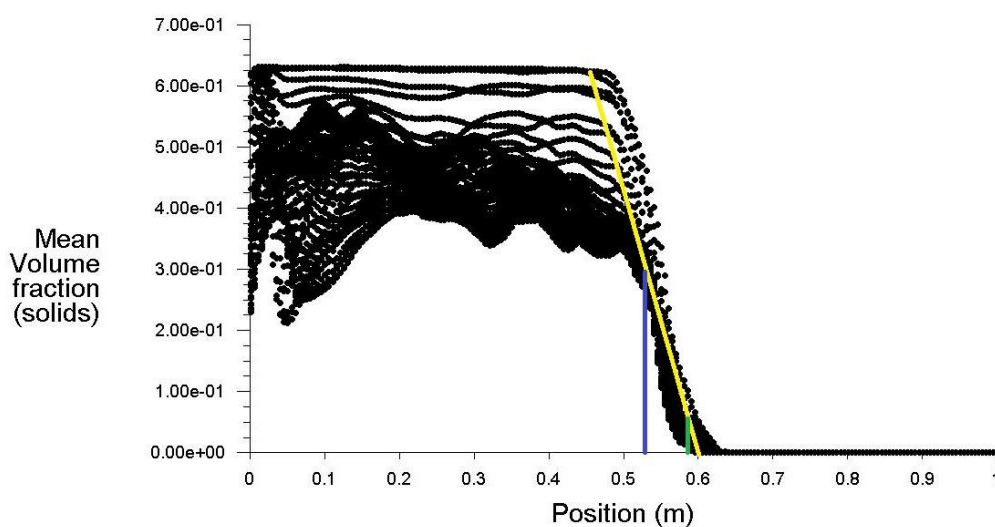
La curva de expansión del lecho fluido obtenida por la U.B.C. con los diferentes modelos de ecuaciones y valores de velocidad del aire, se muestra en la Figura 34.



**Figura 34.** Comparación realizada por U.B.C. del grado de expansión del lecho fluido según la velocidad de inyección de gas para distintos modelos de cálculo con respecto al experimento. Fuente: Taghipour et al. (2005).

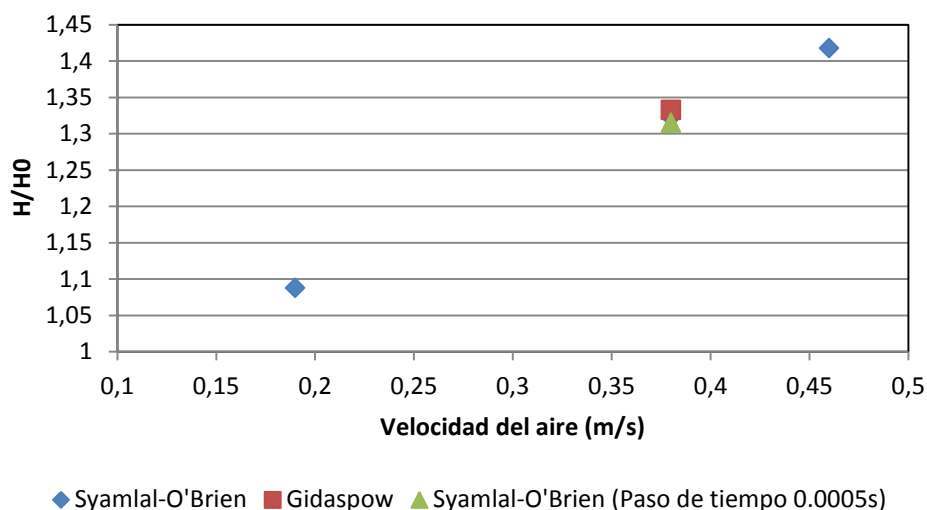
Para poder obtener el grado de expansión del lecho y dado que no se especifica el método utilizado en el estudio de la U.B.C., ni en qué punto consideran la presencia de partículas despreciable, se ha optado por utilizar dos criterios y comprobar cuál se asemeja más a los resultados expuestos.

En la Figura 35 se muestra de un modo ilustrativo el método para la obtención del grado de expansión.

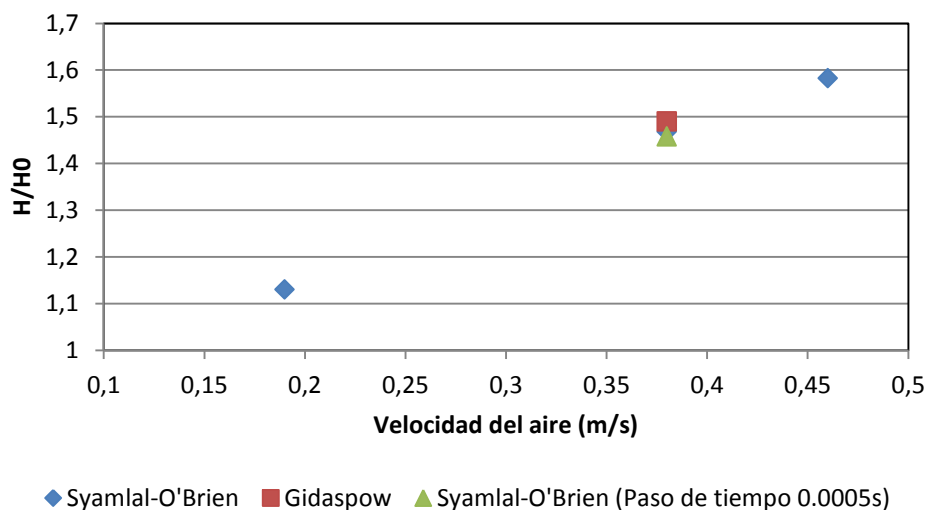


**Figura 35.** Fracción volumétrica de fase sólida (Caso 1; Formulación: Syamlal-O'Brien;  $U=0,38$ ).

Obteniendo el perfil medio de la fracción volumétrica de sólidos en función de la altura del lecho mediante el programa ANSYS Fluent, se traza una línea de tendencia (línea amarilla) y se extraen dos puntos, correspondientes al 50% (línea azul) y al 90% (línea verde). Una vez hallados estos puntos, se podrá obtener el grado de expansión del lecho (Figuras 36 y 37).



**Figura 36.** Grado de expansión del lecho (Criterio del 50%).

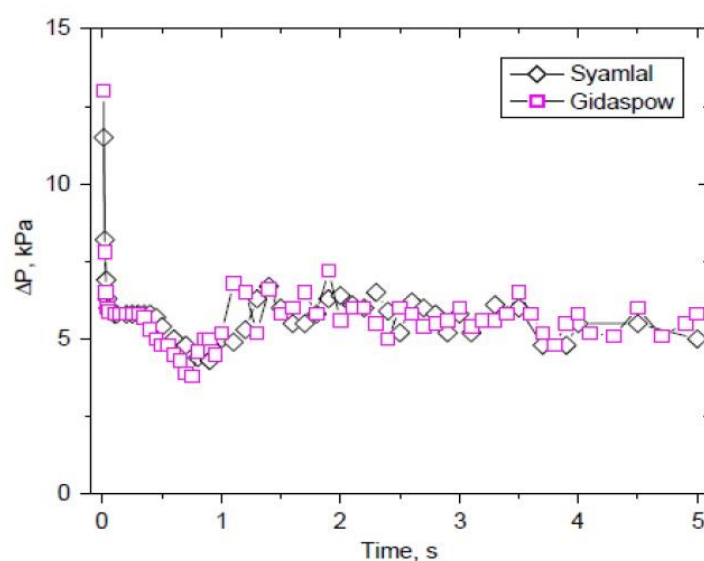


**Figura 37.** Grado de expansión del lecho (Criterio del 90%).

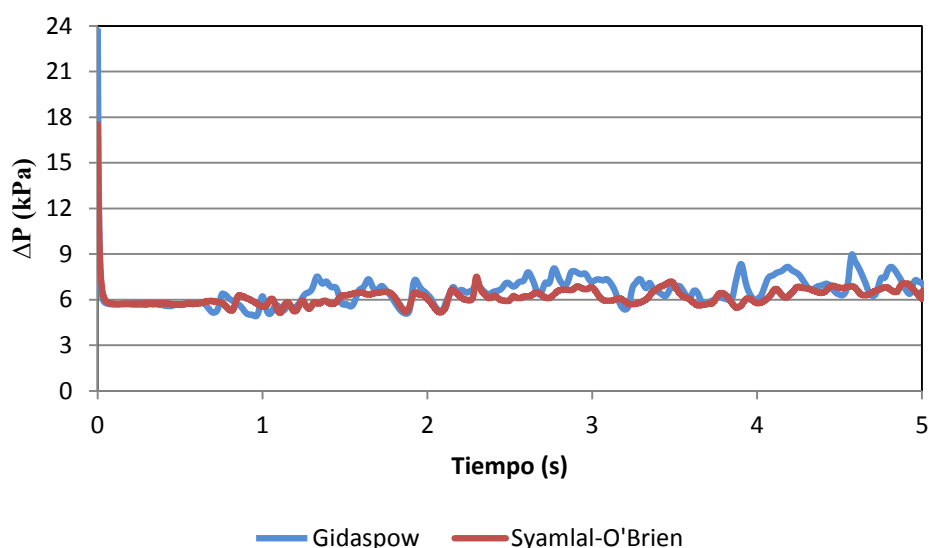
Como se puede apreciar mediante los gráficos, cabe pensar que el criterio utilizado por la U.B.C. fuera cercano al 50% ya que los valores obtenidos de expansión del lecho tienen una mayor similitud que utilizando el criterio del 90%. También se puede observar que en el Caso 3, con el paso de tiempo reducido a 0.0005 segundos, el grado de expansión del lecho disminuye muy poco con respecto a los Casos 1 y 2.

### 6.1.3. Caída de presión en el lecho

A continuación se representa la caída de presión entre la base del lecho y la superficie libre de sólidos. Tanto en el estudio realizado por la U.B.C (Figura 38), como en los obtenidos en las simulaciones (Figura 39), la caída de presión se estabiliza para las dos formulaciones en unos valores muy similares. A pesar de esto los valores difieren aproximadamente en 1 kPa.



**Figura 38.** Comparación realizada por la U.B.C. de la caída de presión en el lecho para los modelos de Syamlal y Gidaspow (Velocidad del aire = 0.38 m/s). Fuente: Taghipour et al. (2005).

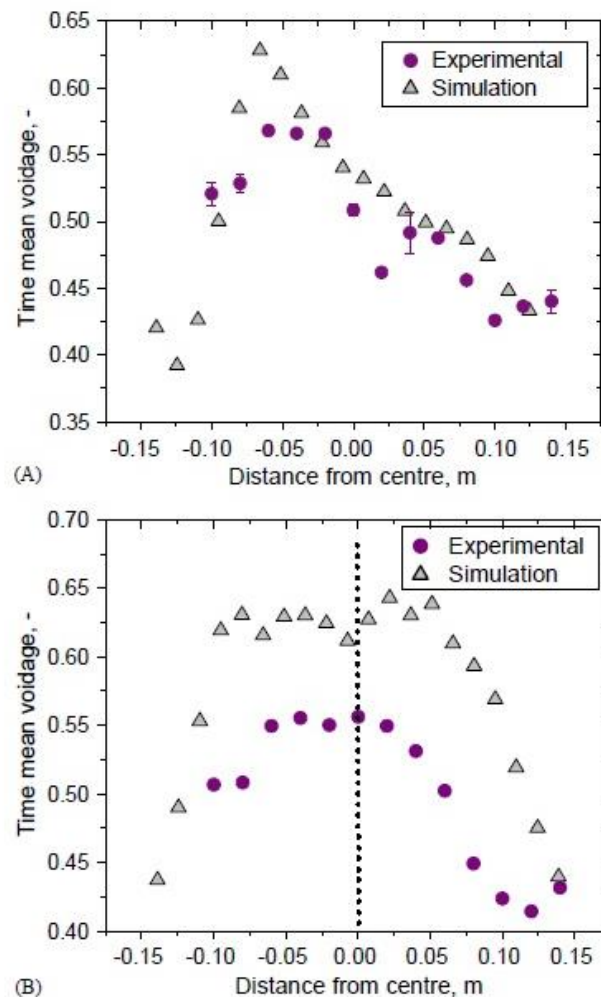


**Figura 39.** Comparación de la caída de presión en el lecho entre los modelos de Syamlal-O'Brien (Caso 1) y Gidaspow (Caso 2),  $U=0.38\text{m/s}$ .

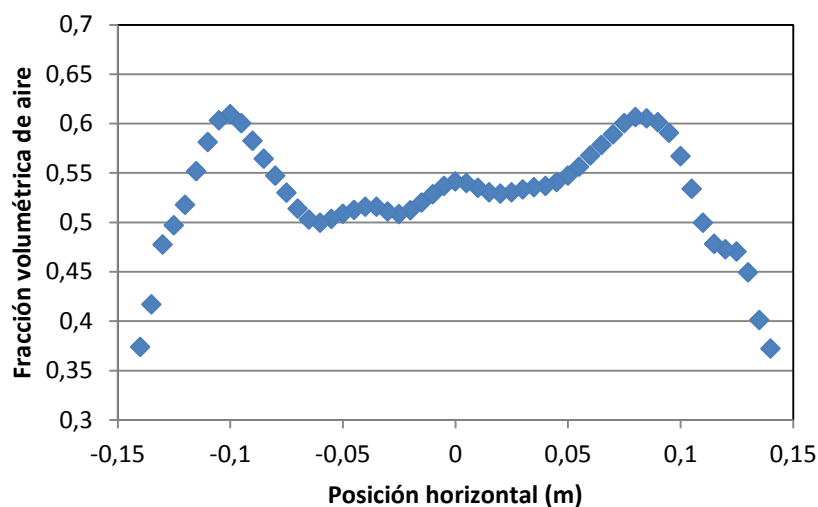
#### 6.1.4. Aparición de burbujas de aire

Tomando valores de media temporales en una línea de control situada a 0.2 metros de la base del lecho, se ha medido la fracción volumétrica de aire para comprobar la presencia de burbujas. En los puntos en los que el valor de la fracción volumétrica sea mayor, será indicativo de que ha habido una mayor presencia de aire.

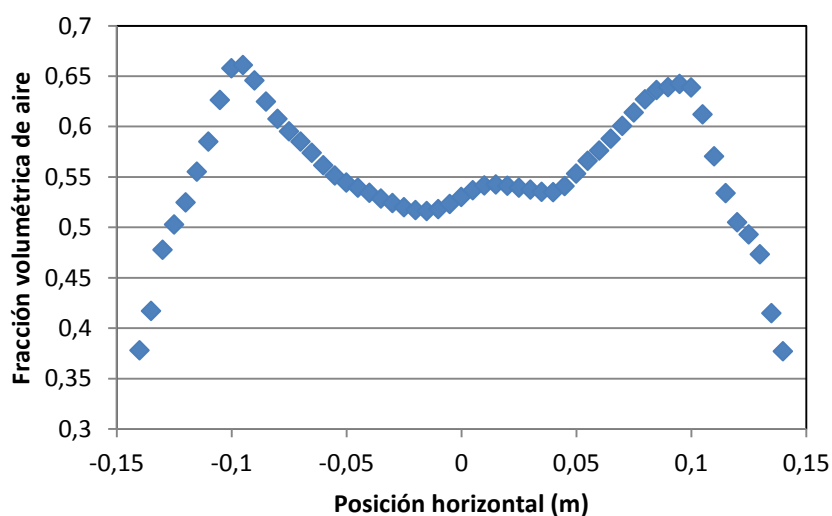
Tomando como referencia los valores obtenidos de fracción volumétrica por la U.B.C. para las dos velocidades dadas (Figura 40). También se representan los de la simulación realizada con las mismas condiciones, Caso 1 (Figura 41) y Caso 4 (Figura 42), con formulación Syamlal-O'Brien y velocidades de 0.38 y de 0.46 m/s, respectivamente.



**Figura 40.** Valores medios de la fracción volumétrica de aire obtenida por la U.B.C. (A)  $z=0.2\text{m}$ ;  $U=0.38\text{m/s}$ , (B)  $z=0.2\text{m}$ ;  $U=0.46\text{m/s}$ . Fuente: Taghipour et al. (2005).



**Figura 41.** Valores medios de la fracción volumétrica de aire, Caso 1,  $z=0.2$  m,  $U=0.38$  m/s.



**Figura 42.** Valores medios de la fracción volumétrica de aire, Caso 4,  $z=0.2$  m,  $U=0.46$  m/s.

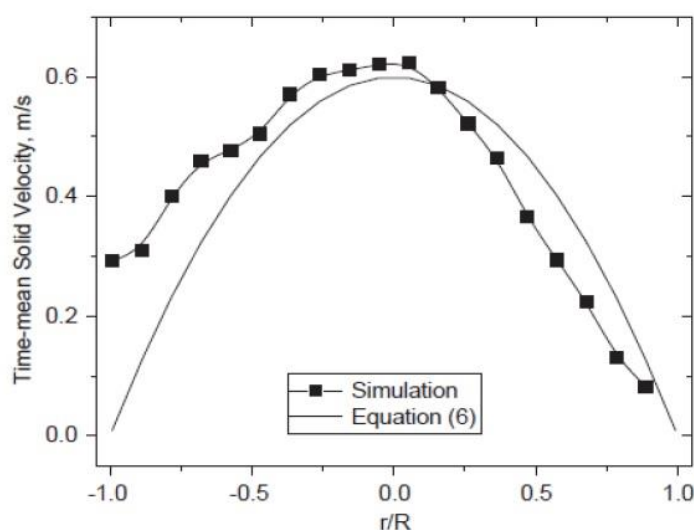
Como se puede observar de los perfiles obtenidos en las simulaciones, existen similitudes entre ambos perfiles, así como una cierta simetría en el lecho. A diferencia de los datos obtenidos por la U.B.C. y publicados en el artículo, en los que está representados perfiles irregulares y asimétricos. Esto puede deberse a que el tiempo de recogida de datos no fuera suficientemente largo o a que la frecuencia de la obtención de los mismos no fuese la adecuada.

### 6.1.5. Velocidad de las partículas sólidas

Existe una solución analítica aproximada para poder hallar la velocidad de las partículas sólidas. Esta solución está basada en la teoría cinética de los fluidos mixtos de partículas elásticas (Huilin et al., 2003), expresada en coordenadas cilíndricas, la ecuación resultante sería:

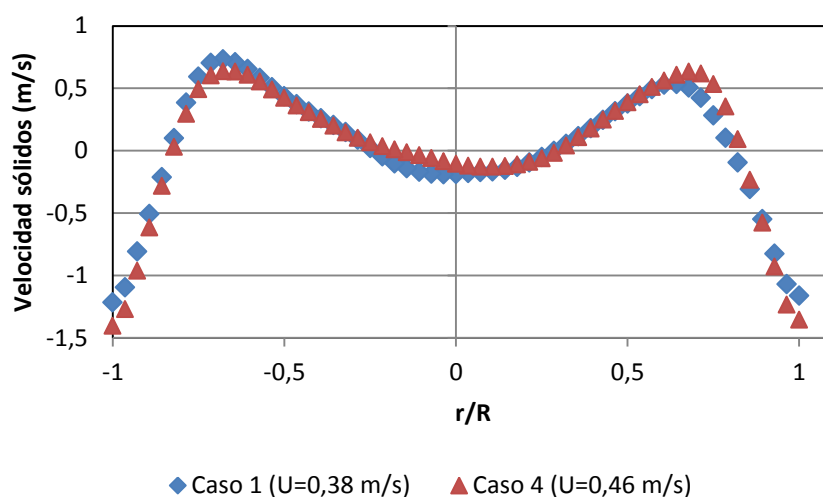
$$v_s = v_{s,max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

Donde  $r$  y  $R$  son la distancia desde el centro del lecho y el tamaño de éste, respectivamente. Esta ecuación proviene de un modelo de aire-partículas que circula a través de un tubo, no considera los modelos de lecho fluidizado, pero se adoptará como comparación, así como lo hace el estudio realizado por la U.B.C. En los resultados publicados se ha utilizado la formulación de ecuaciones de Syamlal-O'Brien, a una altura desde la base del lecho de 0.2 m y una velocidad de inyección de aire de 0.46 m/s (Figura 43).



**Figura 43.** Velocidad vertical de las partículas sólidas frente a la teórica,  $z=0.2\text{m}$ ,  $U=0.46\text{m/s}$ .

Para poder realizar la comparación con el estudio de la U.B.C. se han tomado los datos de los Casos 1 y 4, con la formulación de ecuaciones de Syamlal-O'Brien y con la velocidad de inyección del aire de 0.38 y 0.46 m/s, respectivamente (Figura 44).

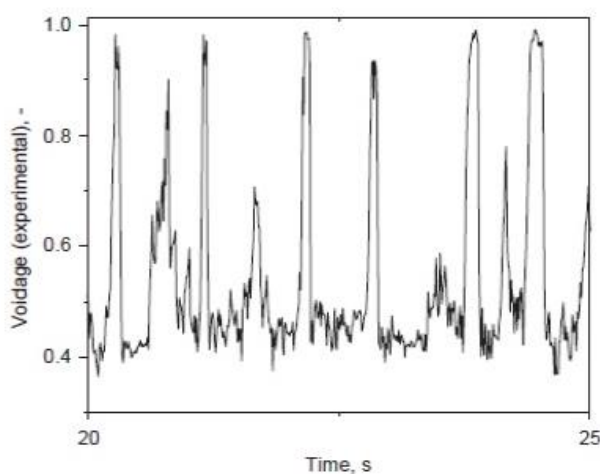


**Figura 44.** Velocidad vertical de las partículas sólidas Caso 1 ( $U=0.38\text{m/s}$ ) y Caso 4 ( $U=0.46\text{m/s}$ ).

#### 6.1.6. Tránsito de burbujas de aire sobre un punto de control

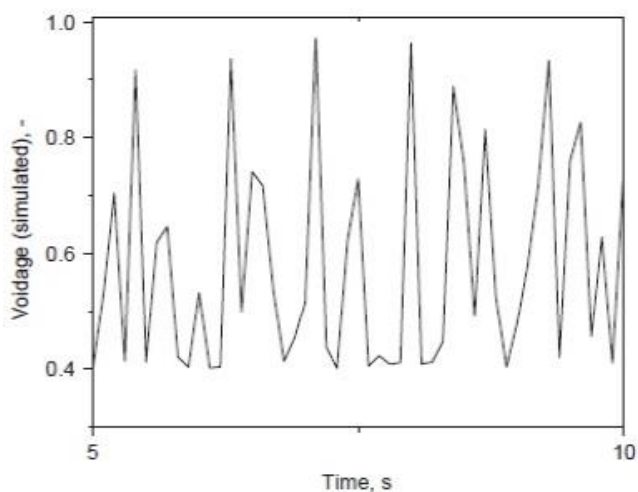
Situando un punto de control centrado en la columna del lecho y a una altura de 0.2 metros desde la base del mismo, se pueden extraer datos sobre el paso de las burbujas por este punto a lo largo del tiempo. Para poder obtener unos resultados adecuados, se ha de simular largos periodos de tiempo, de manera que la fluidización sea lo más estable posible.

A continuación se incluyen los resultados obtenidos por la U.B.C. tanto experimentales (Figura 45), como los resultados de la simulación llevada a una velocidad de entrada del aire de  $0.46\text{ m/s}$  (Figura 45). También se incluyen los resultados obtenidos del Caso 4, siendo este caso el equivalente al desarrollado en el artículo (Figura 46).

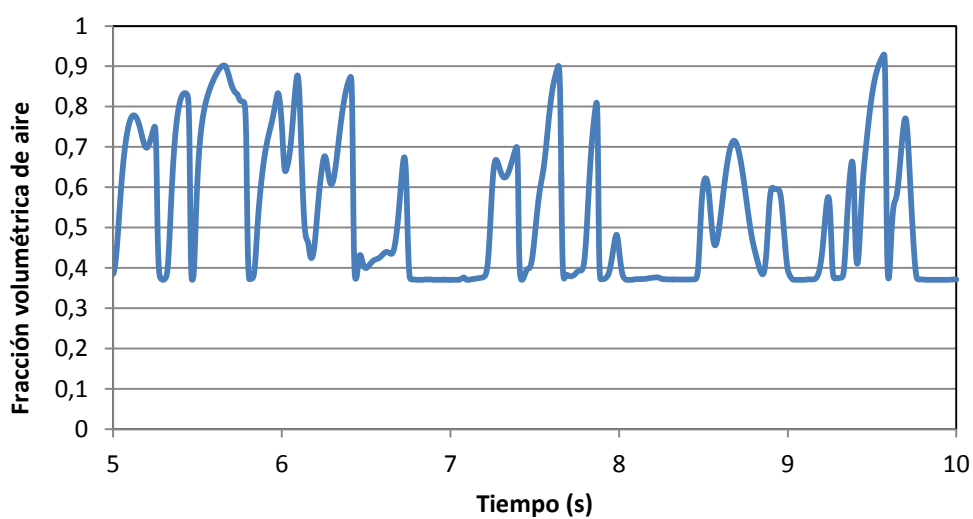


**Figura 45.** Tránsito de burbujas de aire en el caso experimental de la U.B.C.





**Figura 46.** Tránsito de burbujas de aire en el caso simulado de la U.B.C.



**Figura 47.** Tránsito de burbujas de aire en un punto de control, Caso 4 ( $U=0.46\text{m/s}$ ,  $z=0.2\text{m}$ ).

Como se puede observar, el comportamiento de las burbujas es similar, tanto en los resultados obtenidos experimentalmente como en las simulaciones. Cuando no existe ninguna burbuja cercana al punto de control, se mantiene una fracción volumétrica de aire próxima a 0.4. Cada uno de los picos que aparecen, corresponde con el paso de una burbuja. Por otra parte, en la simulación realizada (Figura 47), hay un mayor número de valores pico, lo que significa un mayor paso de burbujas en el mismo espacio de tiempo.

## 6.2. Incorporación de la compresibilidad del gas

En este apartado se muestran los resultados tomados a partir del segundo bloque de simulaciones, descrito anteriormente en el apartado 5.2. Este bloque corresponde a la comparación directa de dos lechos fluidizados en los que uno de ellos se toma el aire como gas compresible. Además de evaluar los resultados obtenidos mediante perfiles de velocidad, perfiles de fracción volumétrica, para el caso con aire compresible, se incluirán mapas de densidad del aire para comprobar su variación a lo largo del tiempo.

En la Tabla 8, resume la información de las distintas simulaciones correspondientes a este bloque.

Caso	Compresibilidad del aire	Formulación	Paso de tiempo (s)	U (m/s)	Tiempo de simulación (s)
6	No	Gidaspow	0.0005	0.5	10
7	Sí	Gidaspow	0.0005	0.5	10

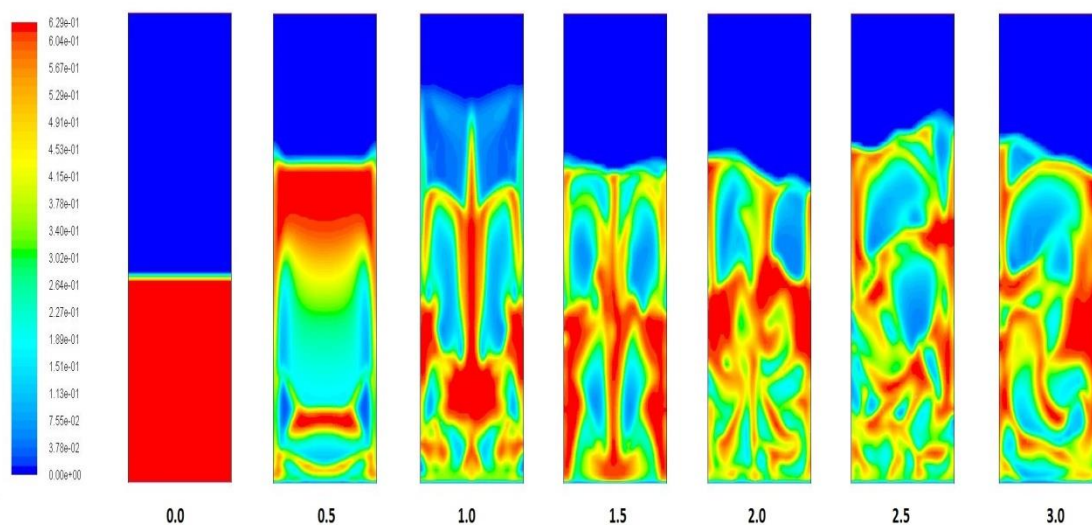
**Tabla 8.** Resumen de los casos del Bloque 2.

Al igual que en el bloque anterior al obtener perfiles de valores medios, se tomarán los valores correspondientes entre 5 y 10 segundos, para que el inicio de la fluidización no interfiera y sea un lecho estable cuando se empieza a obtener resultados.

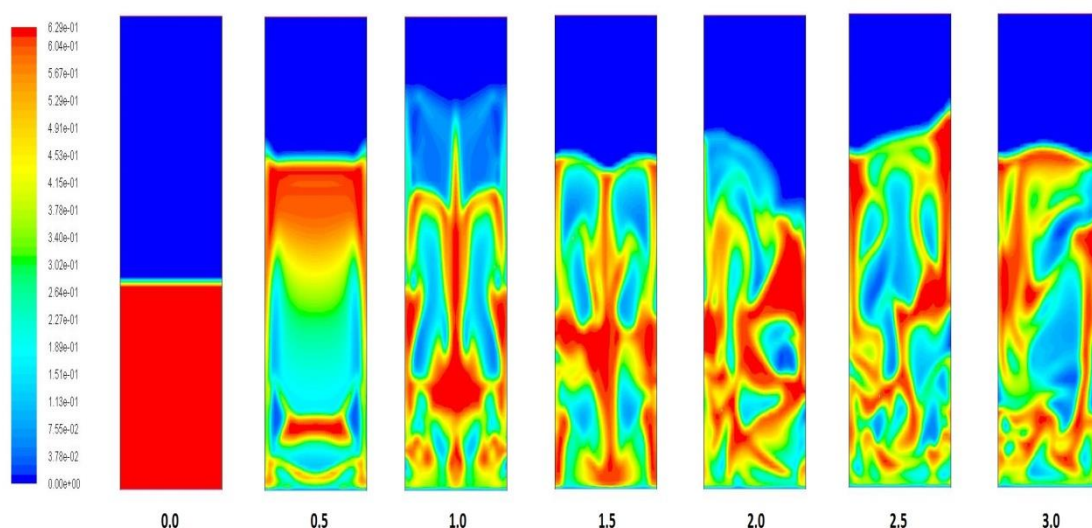
### 6.2.1. Mapas de fracción volumétrica de la fase sólida

Con el fin de realizar una comparación directa de los mapas de fracción volumétrica de sólidos entre los dos casos, con aire incompresible y compresible, se han tomado resultados tanto del inicio de la fluidización, como con el lecho desarrollado. De esta manera, se podrá observar si existen diferencias.

Primero se mostrarán los perfiles de fracción volumétrica de los dos lechos en el inicio de la fluidización hasta los 3 segundos (Figuras 48 y 49).



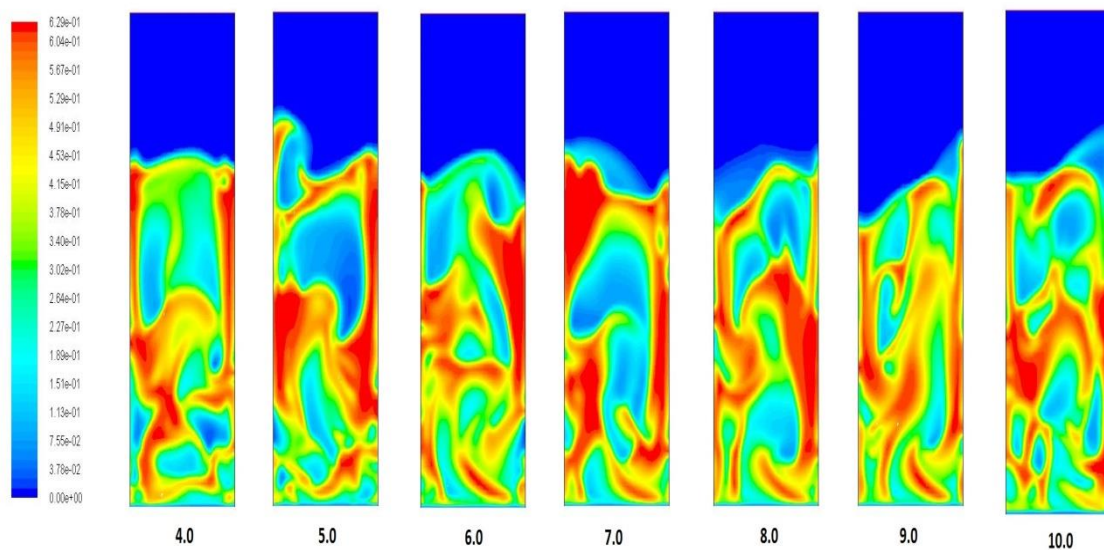
**Figura 48.** Mapas de fracción volumétrica en el inicio de la fluidización, Caso 6 (aire incompresible,  $U=0.5\text{m/s}$ ).



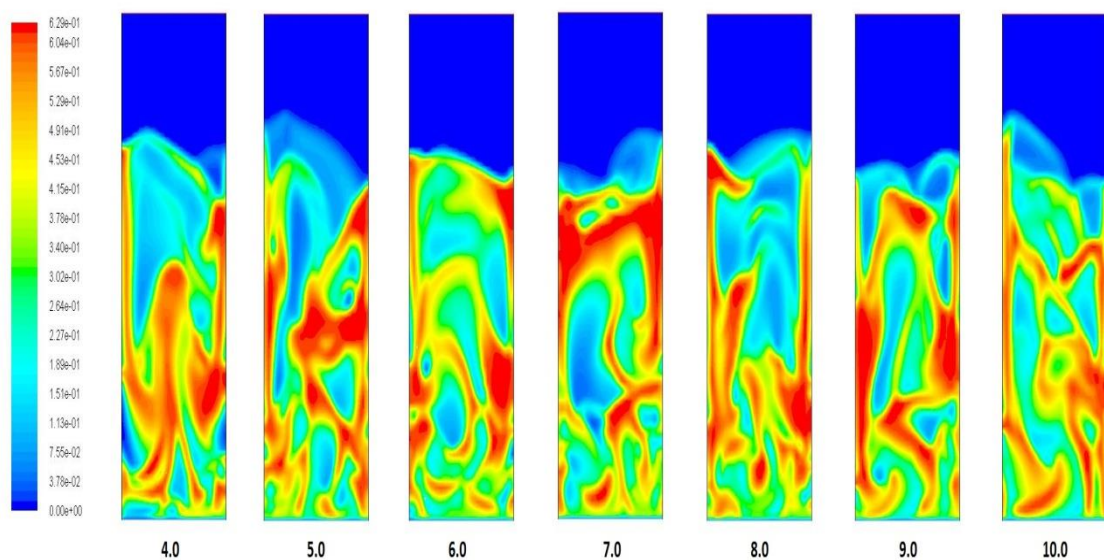
**Figura 49.** Mapas de fracción volumétrica en el inicio de la fluidización, Caso 7 (aire compresible,  $U=0.5\text{m/s}$ ).

Como se puede apreciar en estas imágenes, el inicio de la fluidización resulta muy similar entre las dos simulaciones llevadas a cabo. A pesar de esto, podemos afirmar que en el Caso 7, con el aire compresible (Figura 49), se inicia la fluidización antes que en el Caso 6 (Figura 48). Esto se observa en el mapa correspondiente a los 2 segundos en el que la simetría del lecho está completamente rota, no como en la simulación con aire incompresible, que a los 2 segundos no se ha alcanzado una fluidización desarrollada.

A continuación, se representan los perfiles de fracción volumétrica de sólidos con el lecho ya fluidizado (Figura 50 y 51).



**Figura 50.** Fracción volumétrica de sólidos con el lecho fluidizado, Caso 6 (aire incompresible,  $U=0.5\text{m/s}$ ).



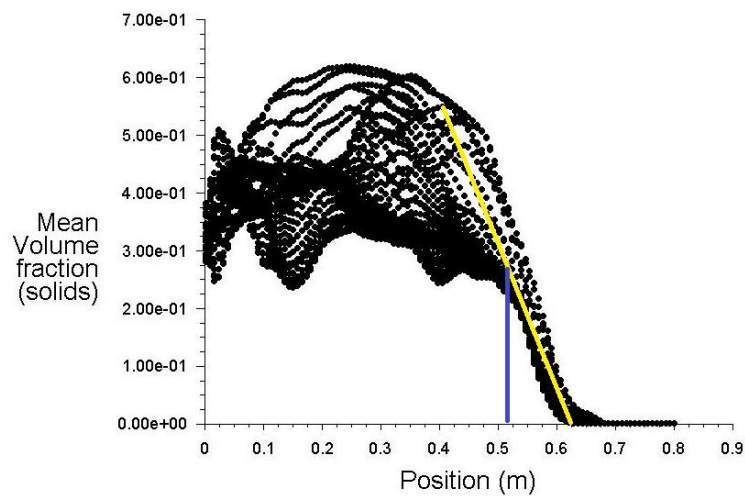
**Figura 51.** Fracción volumétrica de sólidos con el lecho fluidizado, Caso 7 (aire compresible,  $U=0.5\text{m/s}$ ).

Como se puede observar en las imágenes representadas, una vez el lecho está fluidizado, en los perfiles de fracción volumétrica no se aprecian grandes diferencias, ya que ambos lechos están completamente desarrollados y con las burbujas bien definidas.

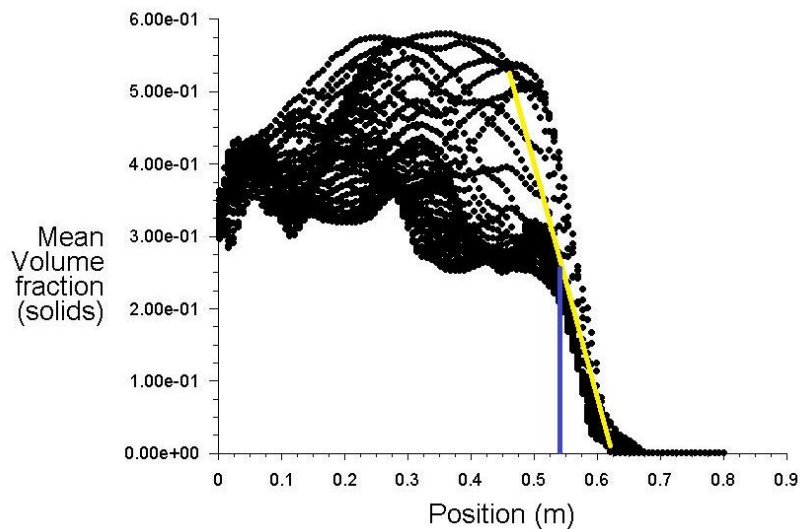
### 6.2.2. Grado de expansión del lecho fluidizado

Debido a que no se han podido determinar diferencias apreciables a simple vista en los mapas de fracción volumétrica, se va a proceder a representar el grado de expansión del lecho fluidizado. De esta manera, poder comprobar si existe alguna diferencia entre los dos lechos.

El grado de expansión, se medirá de forma similar al realizado en el primer bloque de simulaciones, pero como ya se observó que el criterio seguido por la U.B.C. era similar al 50%, se utilizará únicamente este criterio para realizar las medidas (Figuras 52 y 53).



**Figura 52.** Fracción volumétrica en función de la distancia a la base del lecho, Caso 6 (aire incompresible,  $U=0.5\text{m/s}$ ).



**Figura 53.** Fracción volumétrica en función de la distancia a la base del lecho, Caso 7 (aire compresible,  $U=0.5\text{m/s}$ ).

Según se puede apreciar, el grado de expansión del lecho en el caso de aire compresible, es ligeramente mayor al caso con aire incompresible, utilizando la relación con la altura inicial del lecho (0.35 m), se obtendrían los resultados mostrados en la Tabla 9.

	Caso 6	Caso 7
$H/H_0$	1.4743	1.5457

Tabla 9. Grado de expansión en el Bloque 2.

### 6.2.3. Aparición de burbujas de aire

Se han creado varias líneas de control a lo largo del lecho para poder comprobar la presencia de burbujas de aire a distintas alturas, mediante los valores medios temporales de la fracción volumétrica de aire. Estas líneas de control se encuentran situadas a una altura desde la base de 1, 2, 5, 10, 15 y 20 cm cada una, representadas a continuación.

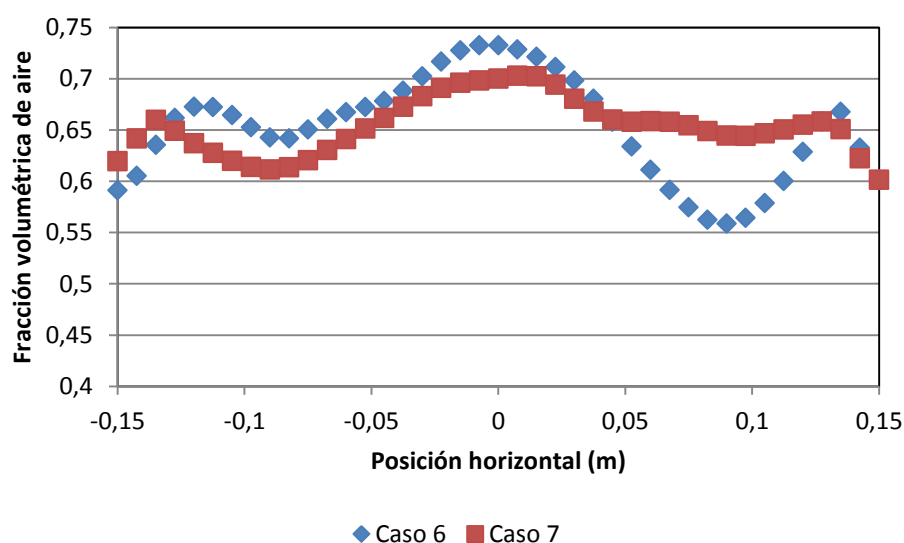


Figura 54. Fracción volumétrica de aire,  $z=0.01m$ .

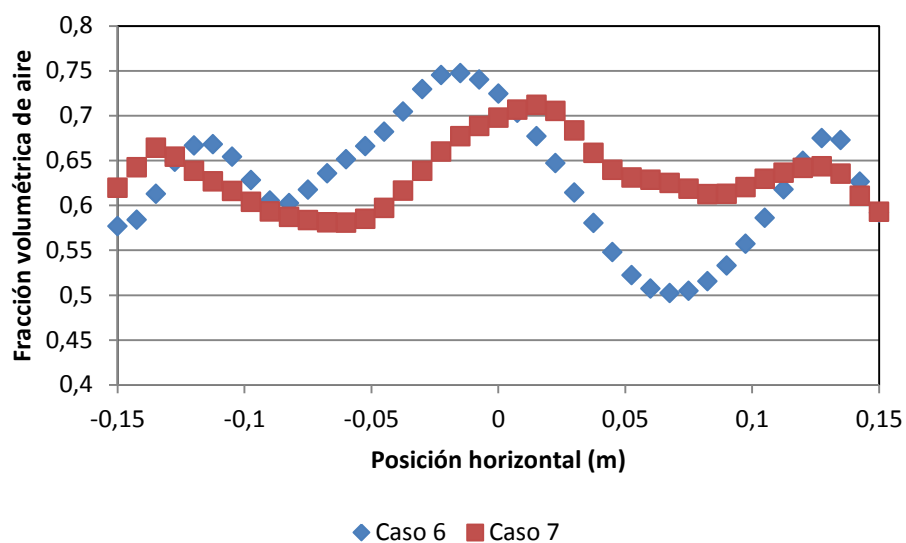


Figura 55. Fracción volumétrica de aire,  $z=0.02\text{m}$ .

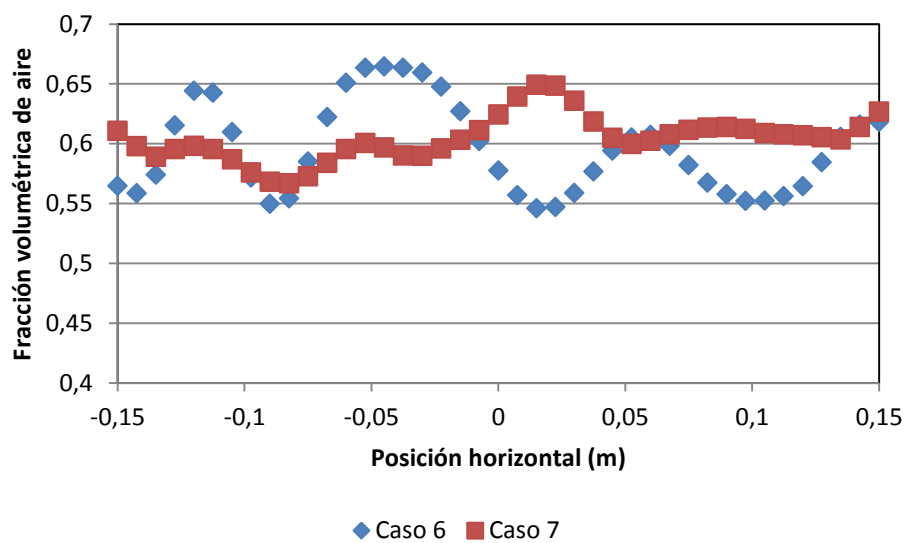


Figura 56. Fracción volumétrica de aire,  $z=0.05\text{m}$ .

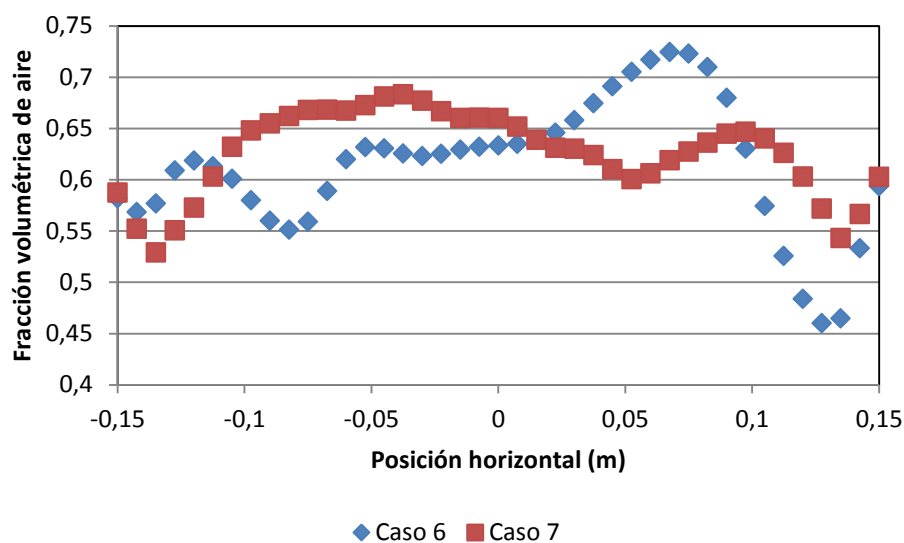


Figura 57. Fracción volumétrica de aire,  $z=0.1\text{m}$ .

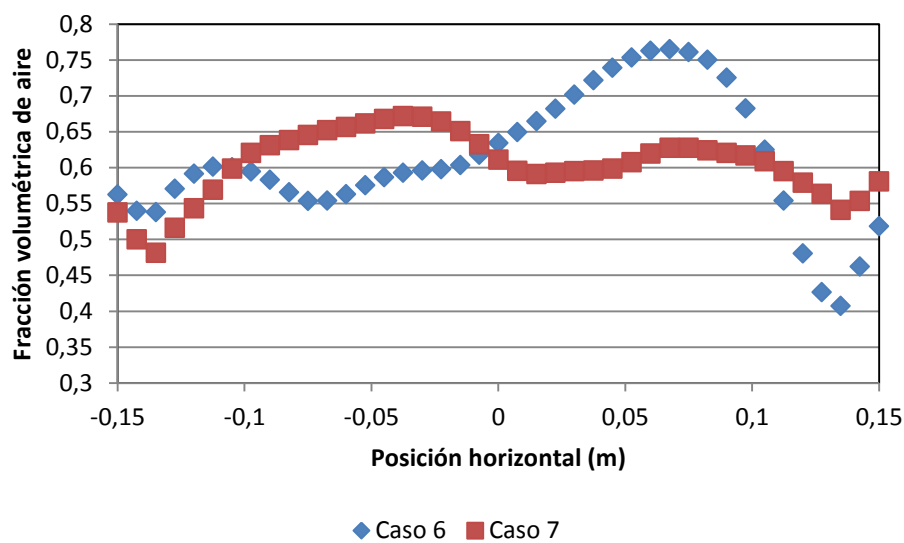


Figura 58. Fracción volumétrica de aire,  $z=0.15\text{m}$ .



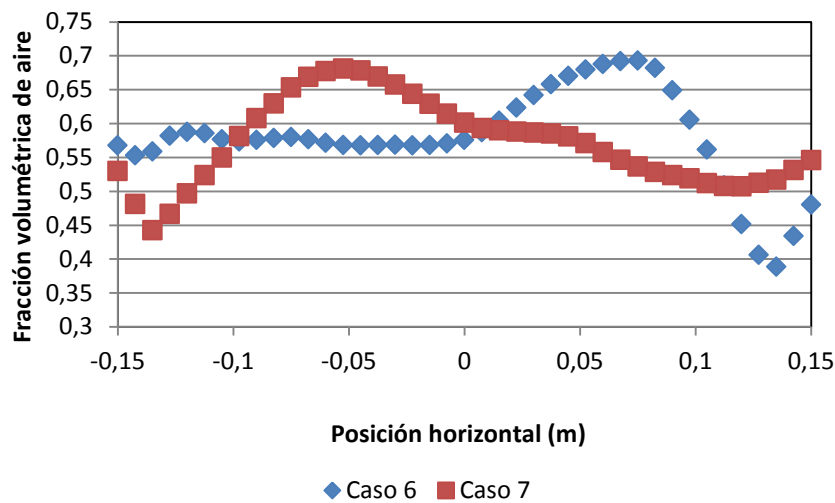


Figura 59. Fracción volumétrica de aire,  $z=0.2\text{m}$ .

Como se puede observar en las imágenes (Figuras 54 a 59), la presencia de burbujas de aire es más notable en el Caso 6, con aire incompresible, que en el caso con aire compresible, donde la fracción volumétrica de aire generalmente mantiene un valor más constante. También se aprecia como al incrementar la altura de la línea de control se hacen más presentes las burbujas de aire en ambos casos, ya que las burbujas se van desarrollando en su ascenso a la superficie.

#### 6.2.4. Caída de presión en el lecho

Se ha creado una línea de control vertical en el centro de la columna del lecho, para comparar la caída de presión media que ocurre durante el proceso de fluidización.

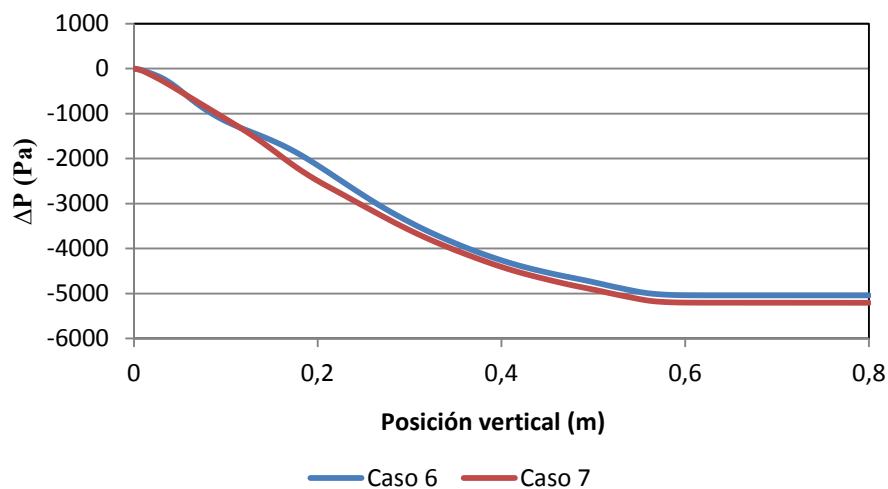


Figura 60. Caída de presión en la columna del lecho.

Como se puede observar en la Figura 60, la caída de presión en el lecho es muy similar, aunque en el caso con el aire compresible es ligeramente mayor que en el caso con aire incompresible. Se aprecia como la diferencia de presión va aumentando desde el fondo del lecho a lo largo de la fase sólida hasta que se vuelve constante en la superficie libre de partículas.

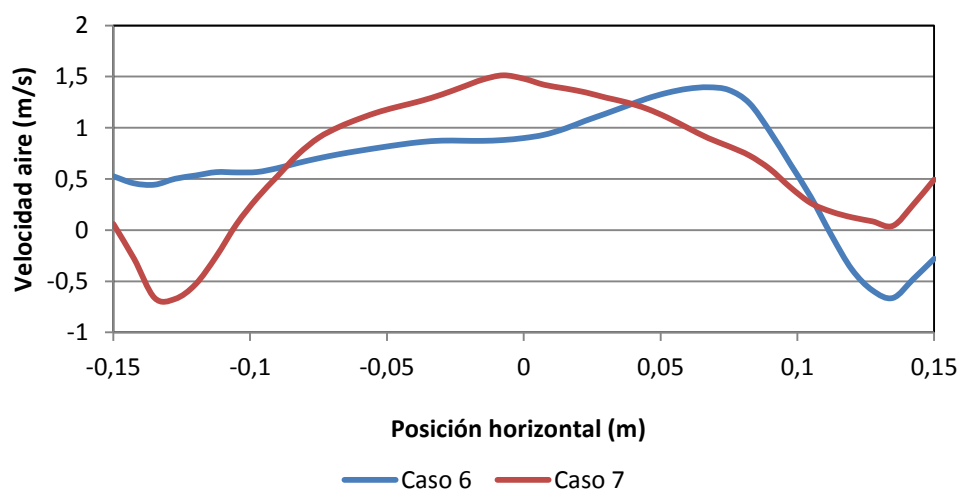
#### 6.2.5. Perfiles de velocidades

En el desarrollo de aplicaciones industriales mediante lechos fluidizados, uno de los factores más importantes a conocer es la velocidad de las partículas sólidas, así como la velocidad del aire. Con el estudio de las velocidades, se puede mejorar la interacción entre las dos fases en el lecho.

Para poder obtener estas velocidades, se ha creado una línea de control situada a 20 cm del fondo del lecho, tras lo que se ha obtenido la velocidad media en la línea.

##### 6.2.5.1. Velocidad del aire

Primero se representará la velocidad vertical del aire a lo largo de la línea de control (Figura 61).



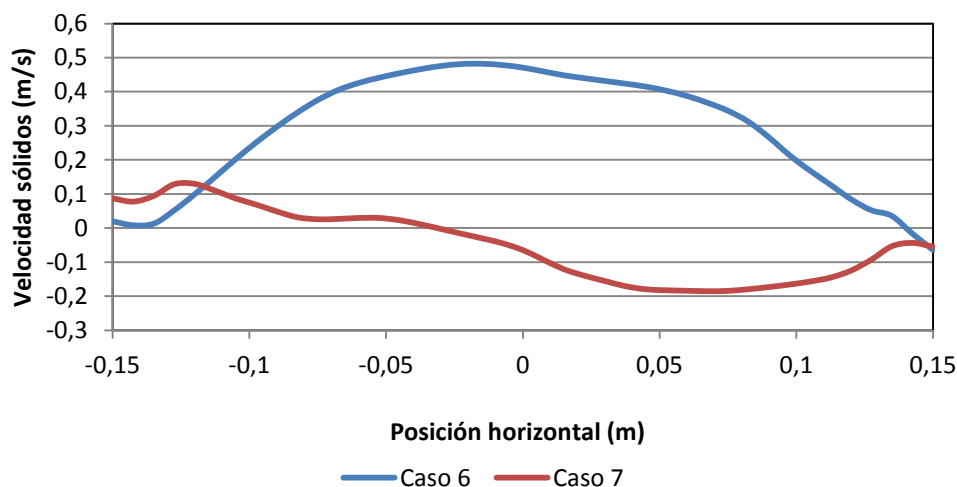
**Figura 61.** Velocidad vertical del aire,  $z=0.2\text{m}$ .

La velocidad del aire, en la línea de control situada a 20 cm del fondo del lecho, difiere entre los casos con aire compresible e incompresible. El caso con aire compresible tiene mayor simetría que el caso con aire incompresible. Sin embargo

alcanza velocidades negativas, lo que conllevaría una defluidización en las zonas cercanas a las paredes.

#### 6.2.5.2. Velocidad horizontal de los sólidos

Los resultados de la media de la velocidad horizontal de las partículas sólidas sobre la línea de control para los dos casos, se muestran en la Figura 62.

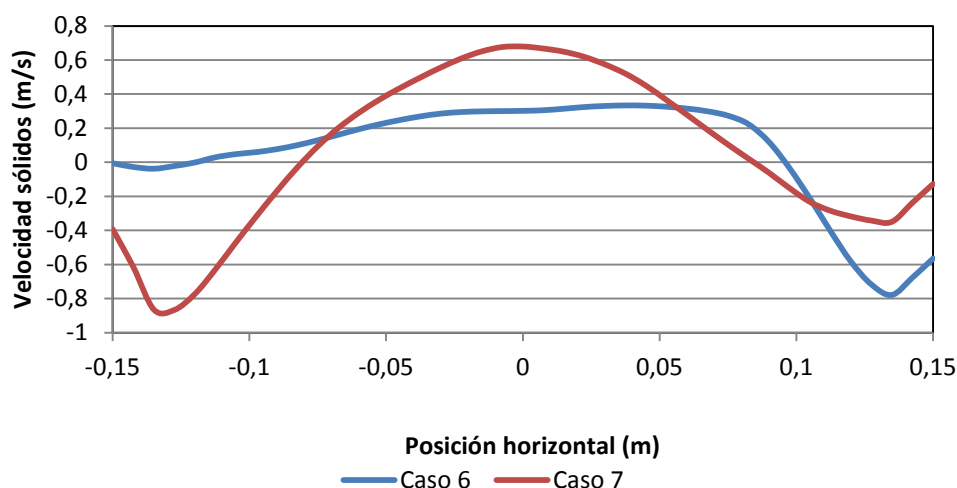


**Figura 62.** Velocidad horizontal de las partículas sólidas,  $z=0.2\text{m}$ .

Como se observa, en el caso con el aire incompresible, la media de la velocidad horizontal de las partículas sólidas tiene un perfil positivo a lo largo de la curva, lo que indica que la componente horizontal de la velocidad hará que las partículas vayan hacia el lado derecho del lecho. Por otro lado, en el caso con aire compresible, el perfil medio de velocidades, indica que las partículas tienden a ir hacia el centro del lecho.

#### 6.2.5.3. Velocidad vertical de los sólidos

En último lugar, se representa la media de la velocidad vertical de las partículas sólidas a lo largo de la línea de control (Figura 63).



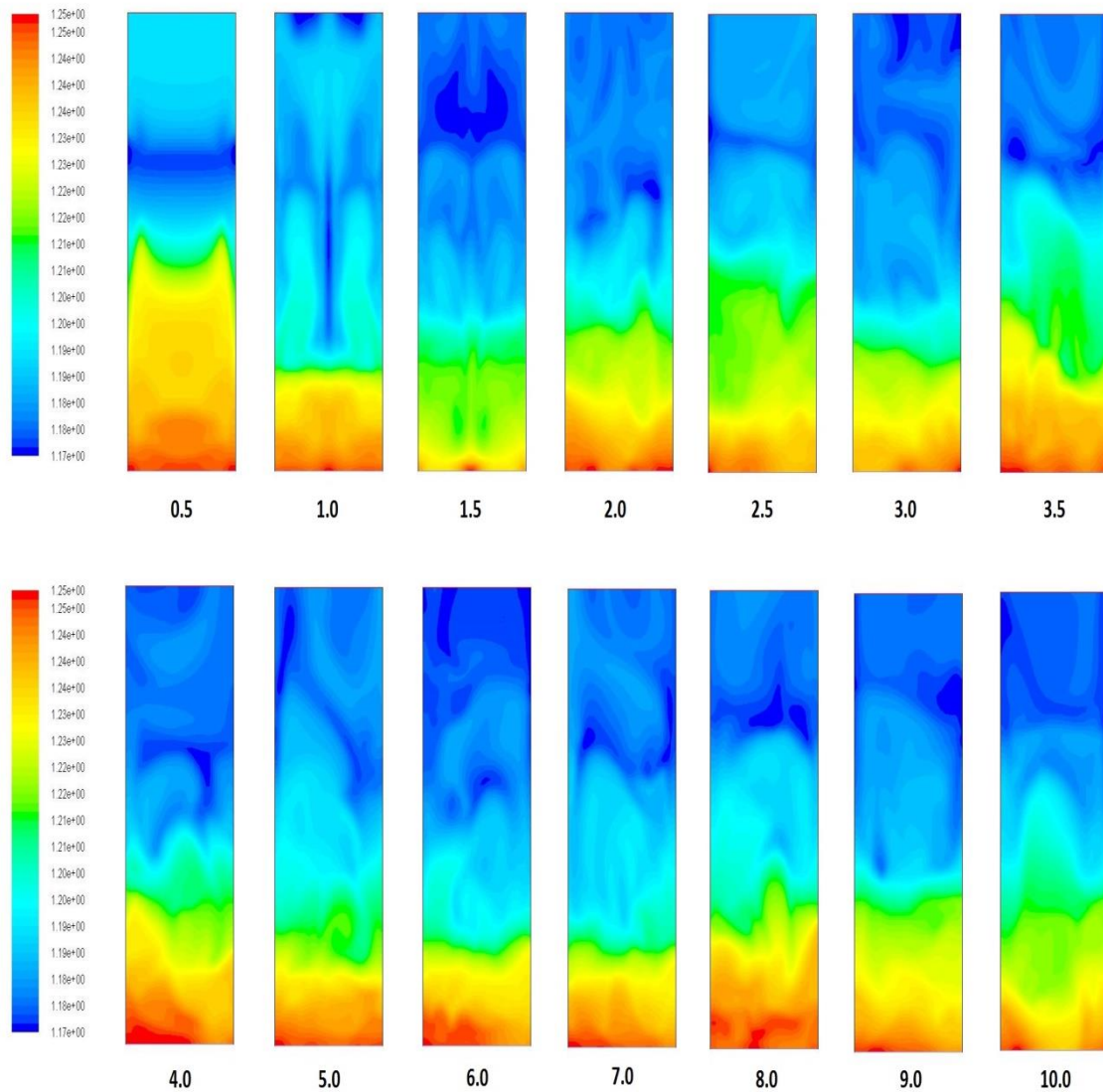
**Figura 63.** Velocidad vertical de las partículas sólidas,  $z=0.2\text{m}$ .

En el caso de los perfiles de velocidades verticales de las partículas sólidas, sigue habiendo diferencias entre los dos casos. Mientras que en el caso con aire compresible, se aprecia un perfil mayormente simétrico, en el caso con aire incompresible, el perfil de velocidades es irregular.

#### 6.2.6. Mapas de densidad

La densidad del aire en el Caso 7, con aire compresible, no es constante y varía según la presión y la velocidad con la que circula el aire a través de las partículas sólidas en el lecho. El rango de variaciones de densidad no es muy grande, debido a que tanto la velocidad como la presión que sufre el aire, son muy bajas como para provocar grandes cambios de densidad.

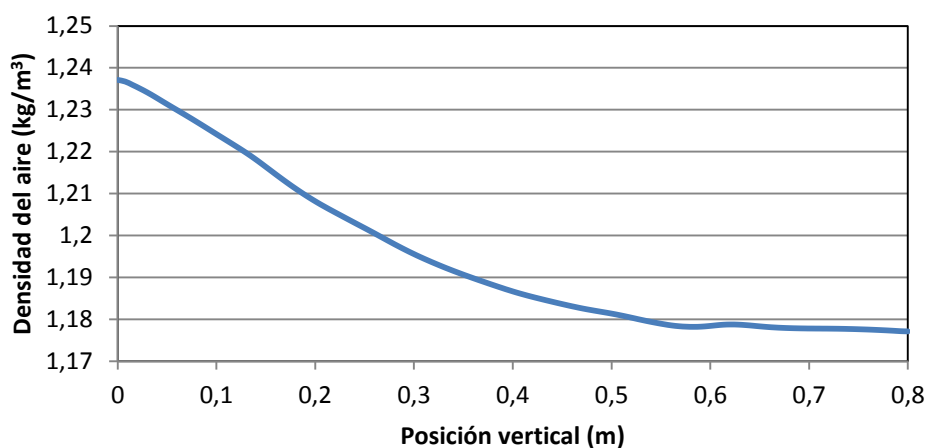
En la Figura 64 se representarán los mapas de densidad del lecho fluidizado en varios instantes temporales.



**Figura 64.** Mapas de densidad del aire en el lecho fluidizado.

Como se puede ver, el aire con mayor densidad está al fondo del lecho, debido a que este aire, tiene que superar una mayor columna de partículas sólidas y se encuentra a mayor presión que el aire que está en la superficie libre de sólidos. Los cambios de densidad de las diferentes zonas a lo largo del lecho, corresponden con una mayor concentración de partículas o con el paso de burbujas, donde cambia la velocidad del aire y la presión a la que está sometido por parte de los sólidos.

En la Figura 65 se representa la media temporal de la densidad en una línea de control a lo largo del lecho y centrada en este.

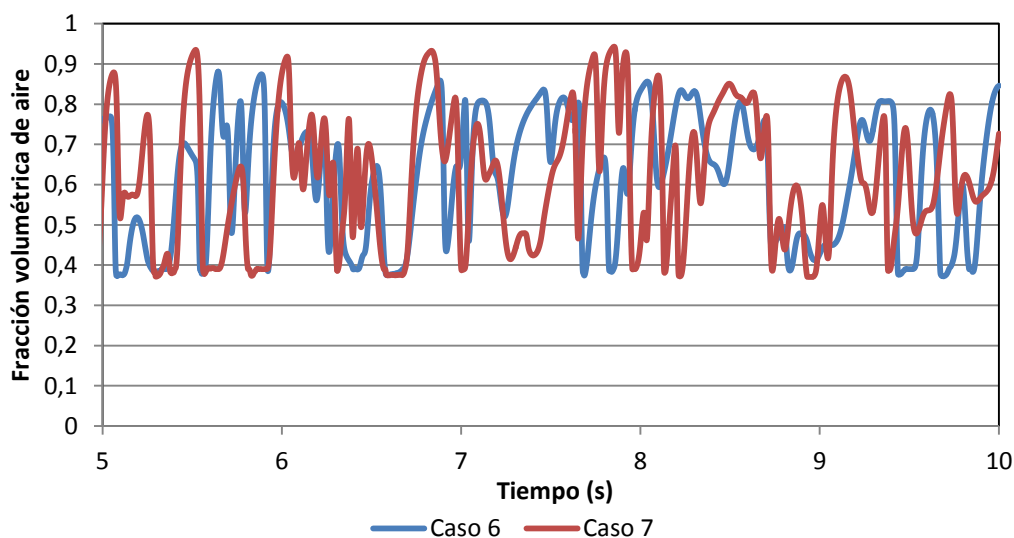


**Figura 65.** Densidad media del aire a lo largo del lecho fluidizado.

Como se puede observar la densidad del aire decrece desde el fondo hasta la superficie libre de sólidos, donde se mantiene aproximadamente constante.

#### 6.2.7. Tránsito de burbujas de aire sobre un punto de control

Para obtener información sobre el paso de las burbujas por el lecho, se ha situado un punto de control a una altura de 0.2 metros desde el fondo del lecho y centrado en este (Figura 66).



**Figura 66.** Tránsito de burbujas de aire en un punto de control, Caso 6 y Caso 7.

Como se puede apreciar, el tránsito de burbujas a través del punto de control situado en el lecho, es muy similar en ambos casos. Tanto los valores pico, como el valor base cuando no hay paso de burbujas en el punto, coinciden en los dos casos. Además, se puede observar como hay un número similar de pasos de burbuja a través del punto de control.

### 6.3. Incorporación de la transferencia de calor al lecho

En el apartado que sigue a continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir del tercer bloque de simulaciones, descrito anteriormente en el apartado 5.3. De forma similar al apartado anterior, se evaluarán los resultados obtenidos de los distintos casos mediante perfiles de velocidad, perfiles de fracción volumétrica, además de la transferencia de calor ocurrida entre la pared y el lecho. En los casos que incluyen la compresibilidad del aire, también se medirá la densidad del aire y sus variaciones en el lecho fluidizado a lo largo del tiempo.

Se resume en la Tabla 10 la información de las distintas simulaciones correspondientes a este bloque.

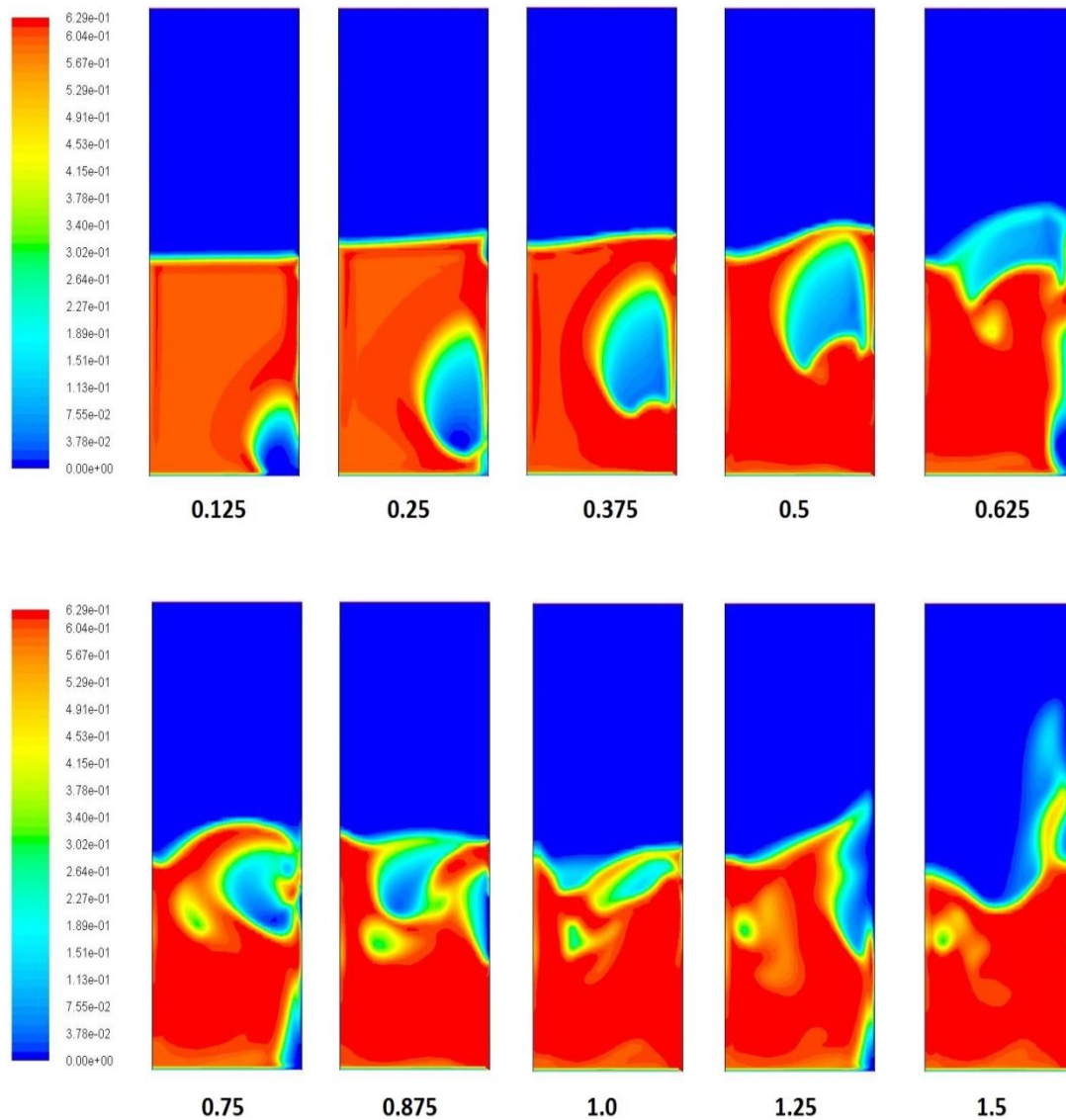
Caso	Compresibilidad del aire	Interacción térmica gas-partícula	Formulación	Paso de tiempo (s)	U (m/s)	U <sub>jet</sub> (m/s)	Tiempo de simulación (s)
8	No	No	Gidaspow	0.00025	0.08	5	3
9	Sí	No	Gidaspow	0.00025	0.08	5	3
10	Sí	Sí	Gidaspow	0.00025	0.08	5	3

**Tabla 10.** Resumen de los casos del Bloque 3.

En este apartado, al incluir la salida de aire a través del jet pulsante, se han tomado valores medios durante toda la simulación, ya que los pulsos de entrada de aire a gran velocidad se han simulado las suficientes veces para dar resultados estables.

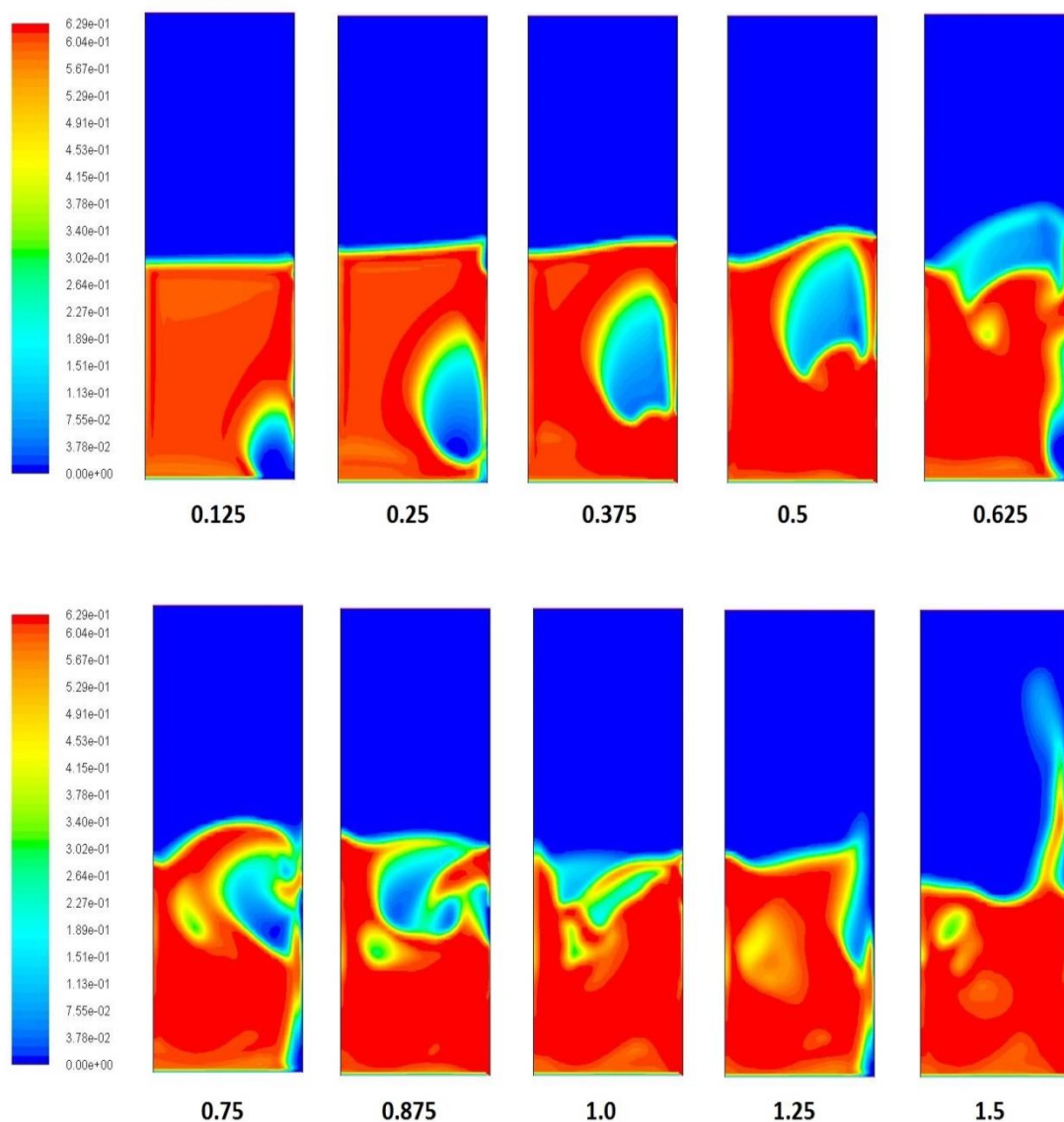
#### 6.3.1. Mapas de fracción volumétrica de la fase sólida

Para realizar una comparación entre los casos, se han tomado resultados de los mapas de fracción volumétrica a lo largo del tiempo. Para ver la influencia del jet sobre el lecho, se han extraído imágenes durante el primer segundo y medio de simulación (Figuras 67 a 69).

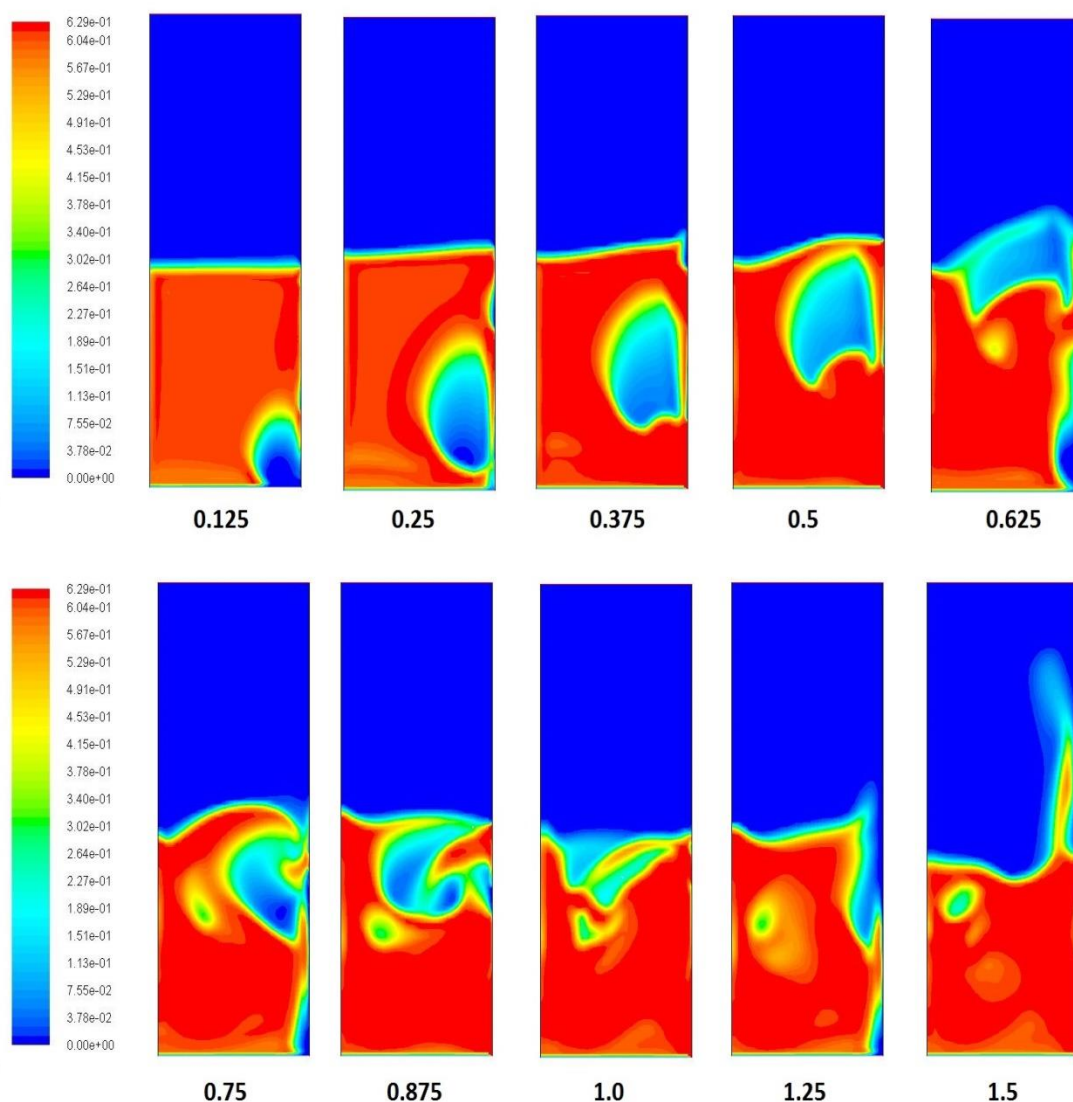


**Figura 67.** Mapas de fracción volumétrica de sólidos en el Caso 8.





**Figura 68.** Mapas de fracción volumétrica de sólidos en el Caso 9.



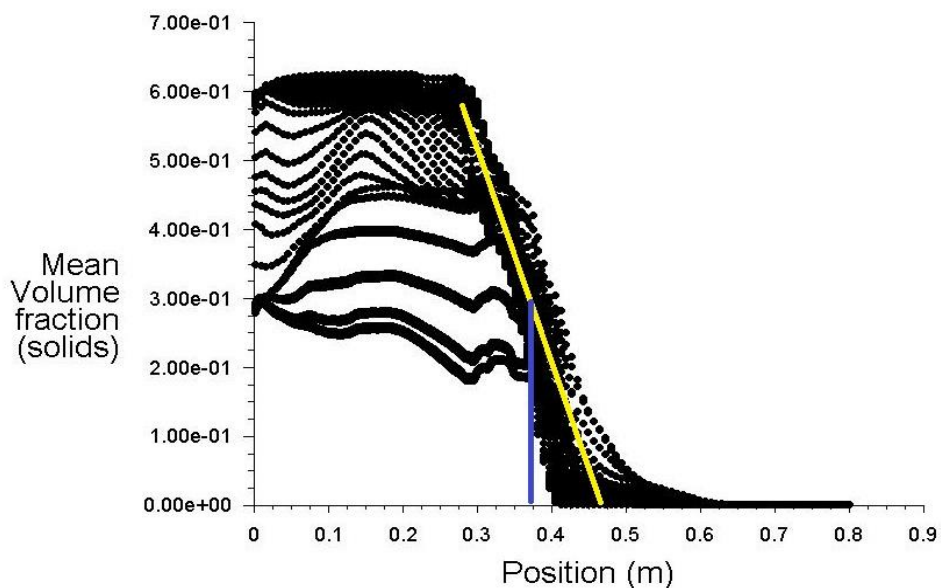
**Figura 69.** Mapas de fracción volumétrica de sólidos en el Caso 10.

Como se puede observar en las imágenes, no existe gran diferencia entre los casos en cuestión a los mapas de fracción volumétrica de sólidos. Esto se debe a que la única forma de fluidización en este caso es la entrada de aire a gran velocidad, ya que por la parte inferior del lecho, el aire entra con la velocidad mínima de fluidización, velocidad que mantiene el lecho fluidizado, pero sin que aparezcan burbujas o sin que haya una notable expansión en el lecho.

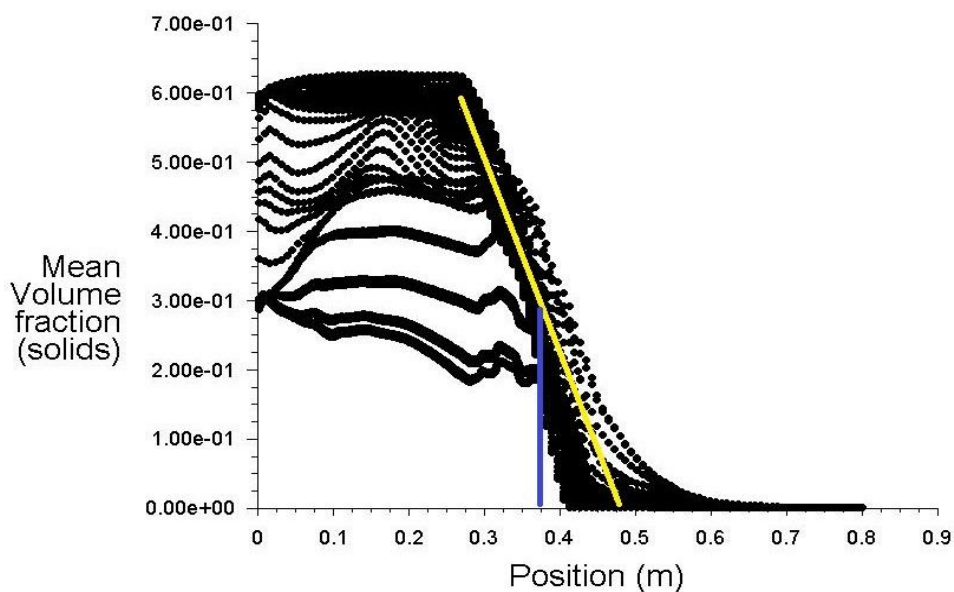
Se puede apreciar el crecimiento de la primera burbuja y como al hacerse suficientemente grande, se separa del fondo y se empieza a elevar hasta que rompe en la superficie. Esto se debe a que el lecho empieza desde el reposo y necesita desarrollarse.

### 6.3.2. Grado de expansión del lecho fluidizado

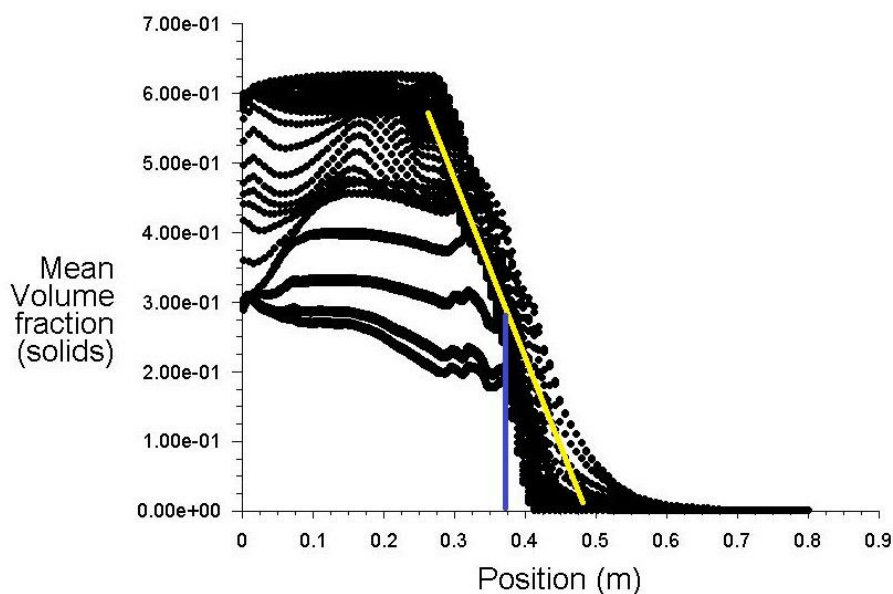
Se va a proceder a representar el grado de expansión (Figuras 70 a 71), para mostrar como el lecho mínimamente fluidizado se expande muy poco, al contrario que los lechos burbujeantes. Se ha seguido el mismo criterio que en los anteriores bloques para representar la expansión del lecho.



**Figura 70.** Fracción volumétrica en función de la distancia a la base del lecho, Caso 8.



**Figura 71.** Fracción volumétrica en función de la distancia a la base del lecho, Caso 9.



**Figura 72.** Fracción volumétrica en función de la distancia a la base del lecho, Caso 10.

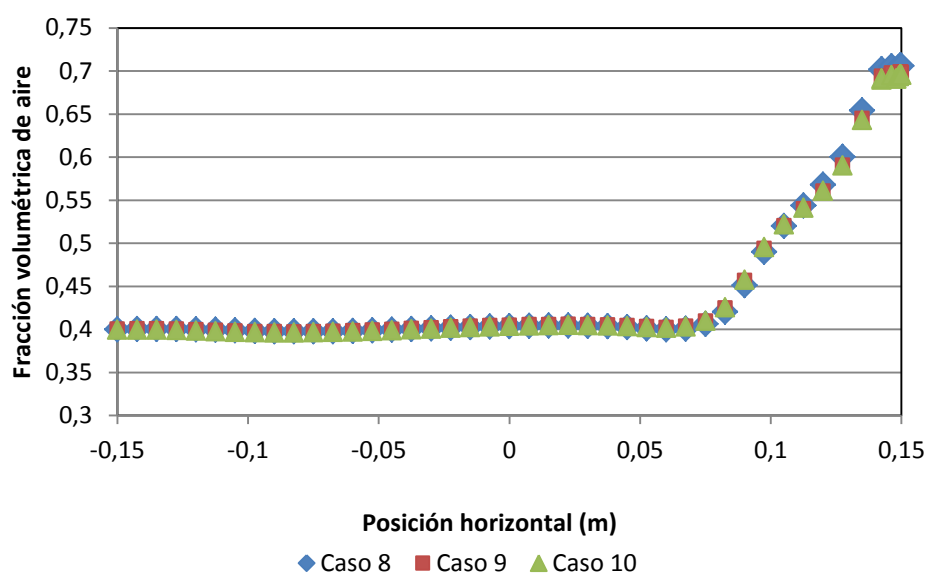
Según se puede apreciar, el grado de expansión del lecho en los casos con aire compresible, es ligeramente mayor al caso con aire incompresible, utilizando la relación con la altura inicial del lecho (0.35 m), se obtendrían los resultados mostrados en la siguiente tabla.

	Caso 8	Caso 9	Caso 10
$H/H_0$	1.0628	1.0657	1.0669

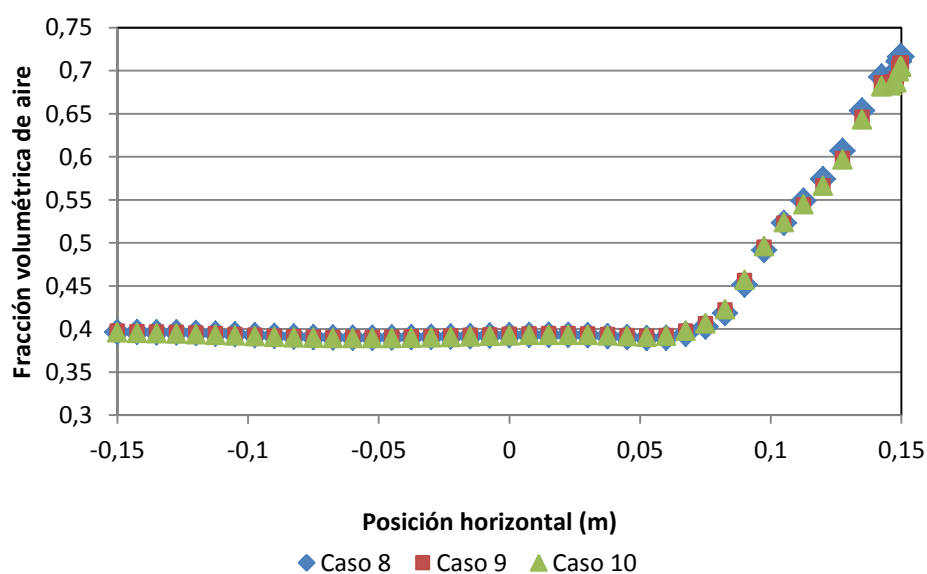
**Tabla 11.** Grado de expansión.

### 6.3.3. Aparición de burbujas de aire

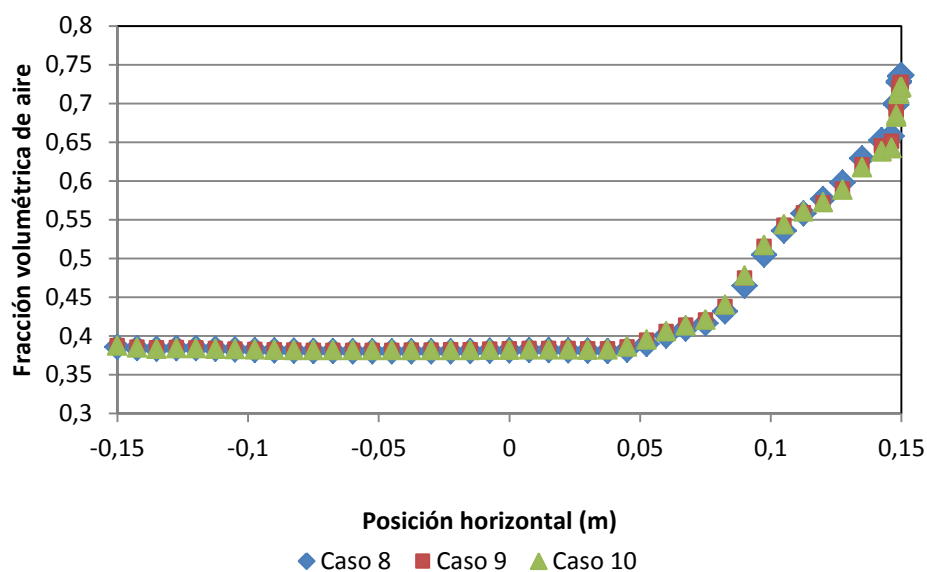
Situando líneas de control a distintas alturas del lecho, podremos controlar la presencia de burbujas de aire en el lecho. Estas líneas de control están situadas a 1, 2, 5, 10, 15, 20 cm respectivamente desde el fondo del lecho (Figuras 73 a 78).



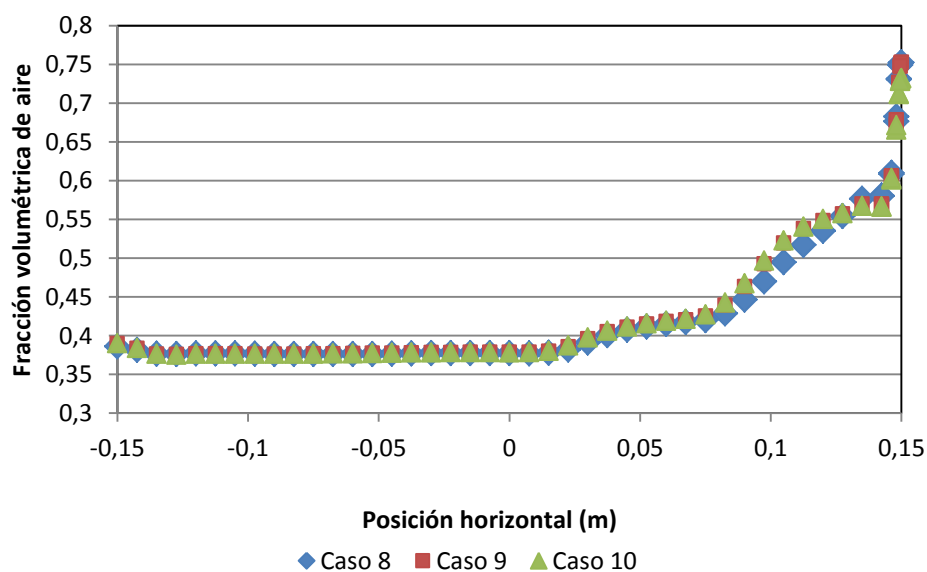
**Figura 73.** Fracción volumétrica de aire,  $z=0.01\text{m}$ .



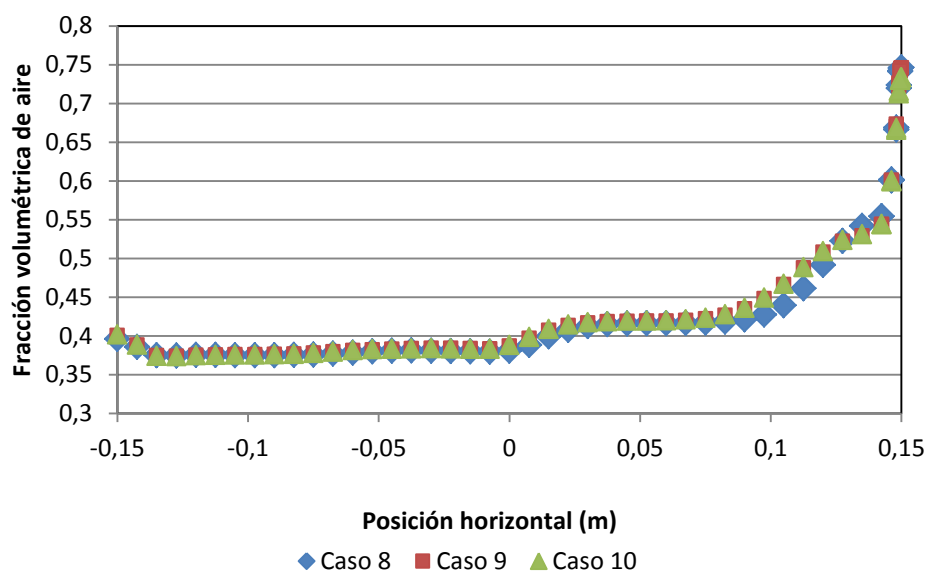
**Figura 74.** Fracción volumétrica de aire,  $z=0.02\text{m}$ .



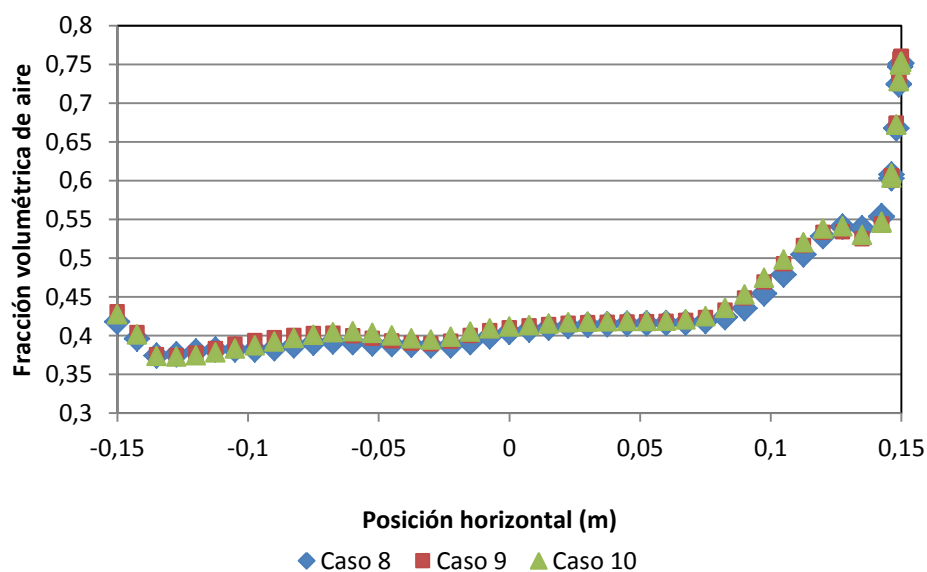
**Figura 75.** Fracción volumétrica de aire,  $z=0.05m$ .



**Figura 76.** Fracción volumétrica de aire,  $z=0.10m$ .



**Figura 77.** Fracción volumétrica de aire,  $z=0.15\text{m}$ .

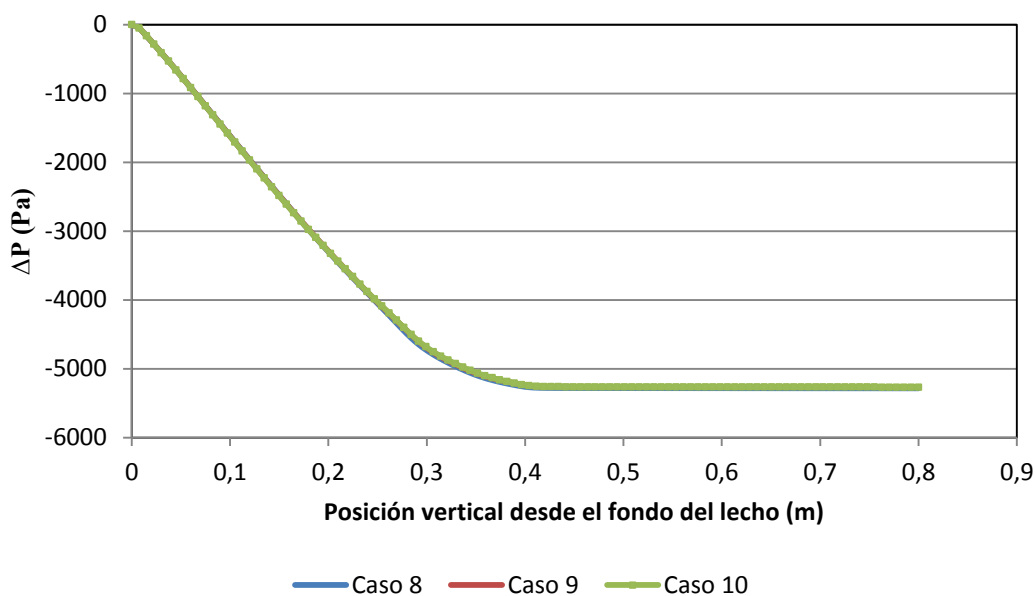


**Figura 78.** Fracción volumétrica de aire,  $z=0.20\text{m}$ .

Como se puede observar en las imágenes (Figuras 73 a 78), la fracción volumétrica en las líneas de control es aproximadamente igual en los tres casos. También se puede apreciar como en la zona cercana a la pared, la fracción volumétrica es mucho mayor que en el resto del lecho debido al paso de las burbujas creadas por la entrada de aire a gran velocidad. En el resto del lecho, permanece con un valor muy cercano a 0.4 debido a que el lecho está mínimamente fluidizado.

#### 6.3.4. Caída de presión en el lecho

Mediante una línea de control, vertical y centrada en la columna del lecho, se ha obtenido la caída de presión.



**Figura 79.** Caída de presión en la columna del lecho.

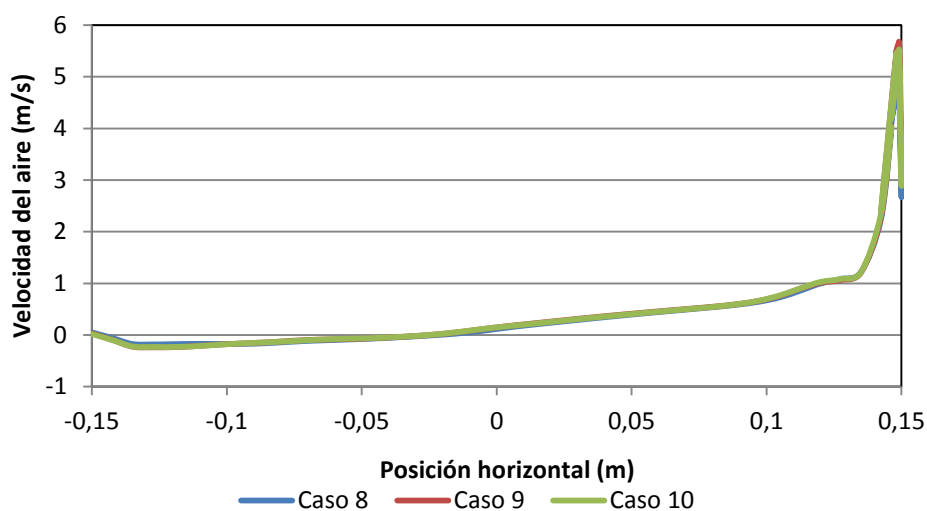
Como se puede observar en la Figura 79, la caída de presión en el lecho es aproximadamente igual todos los casos. Esta diferencia de presión va aumentando desde el fondo del lecho a lo largo de la fase sólida de forma casi lineal hasta que se vuelve constante en la superficie libre de partículas.

#### 6.3.5. Perfiles de velocidades

Al igual que en el bloque anterior, se ha creado una línea de control situada a 20 cm del fondo del lecho para poder obtener las velocidades medias a lo largo de esta línea.

##### 6.3.5.1. Velocidad del aire

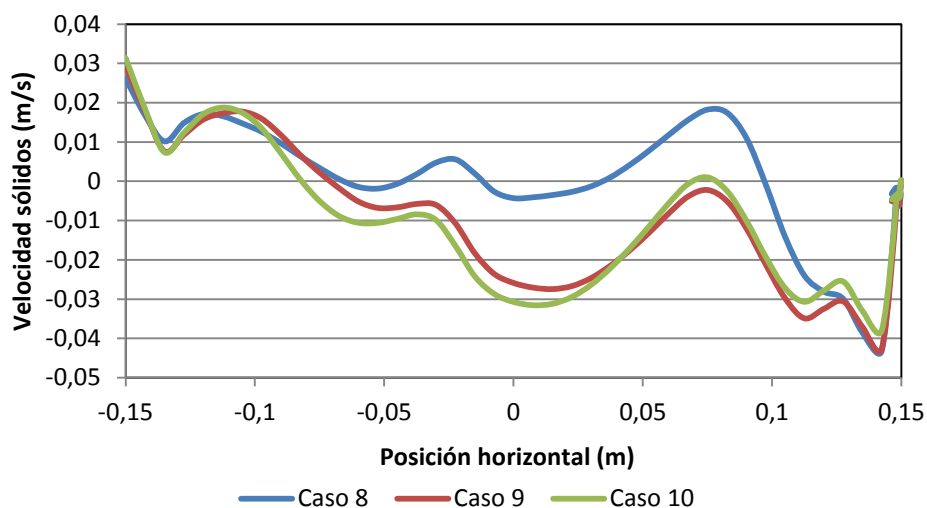




**Figura 80.** Velocidad vertical del aire,  $z=0.2\text{m}$ .

Como se aprecia en la Figura 80, las velocidades verticales del aire coinciden en los casos simulados. El punto máximo de la velocidad se encuentra cercano a la pared, donde ha influido el aire procedente del jet pulsante.

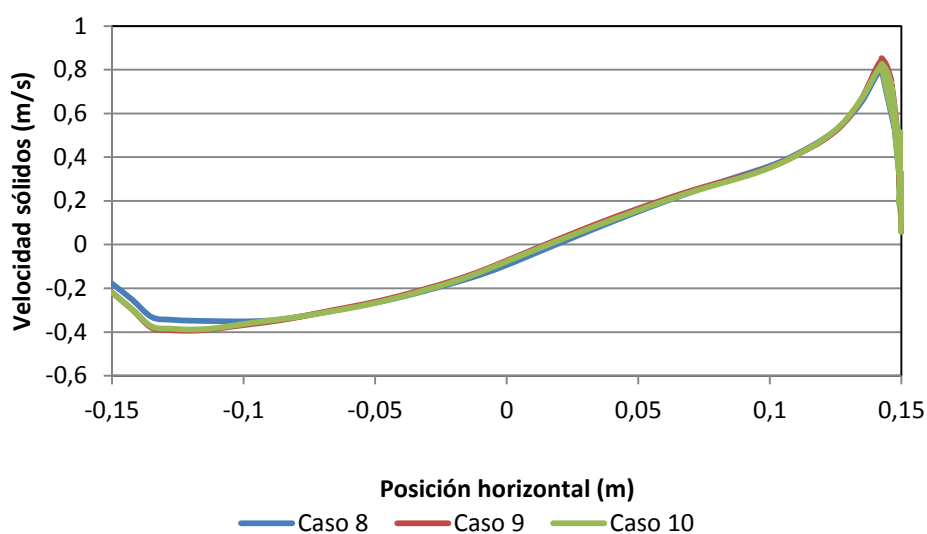
#### 6.3.5.2. Velocidad horizontal de los sólidos



**Figura 81.** Velocidad horizontal de las partículas sólidas,  $z=0.2\text{m}$ .

Como se puede observar en la Figura 81, el perfil de velocidades es similar en los tres casos. Sin embargo en los casos con el aire compresible, la velocidad en el centro del lecho es menor, llegando a ser negativa, al contrario de lo que ocurre en el caso con aire incompresible.

#### 6.3.5.3. Velocidad vertical de los sólidos

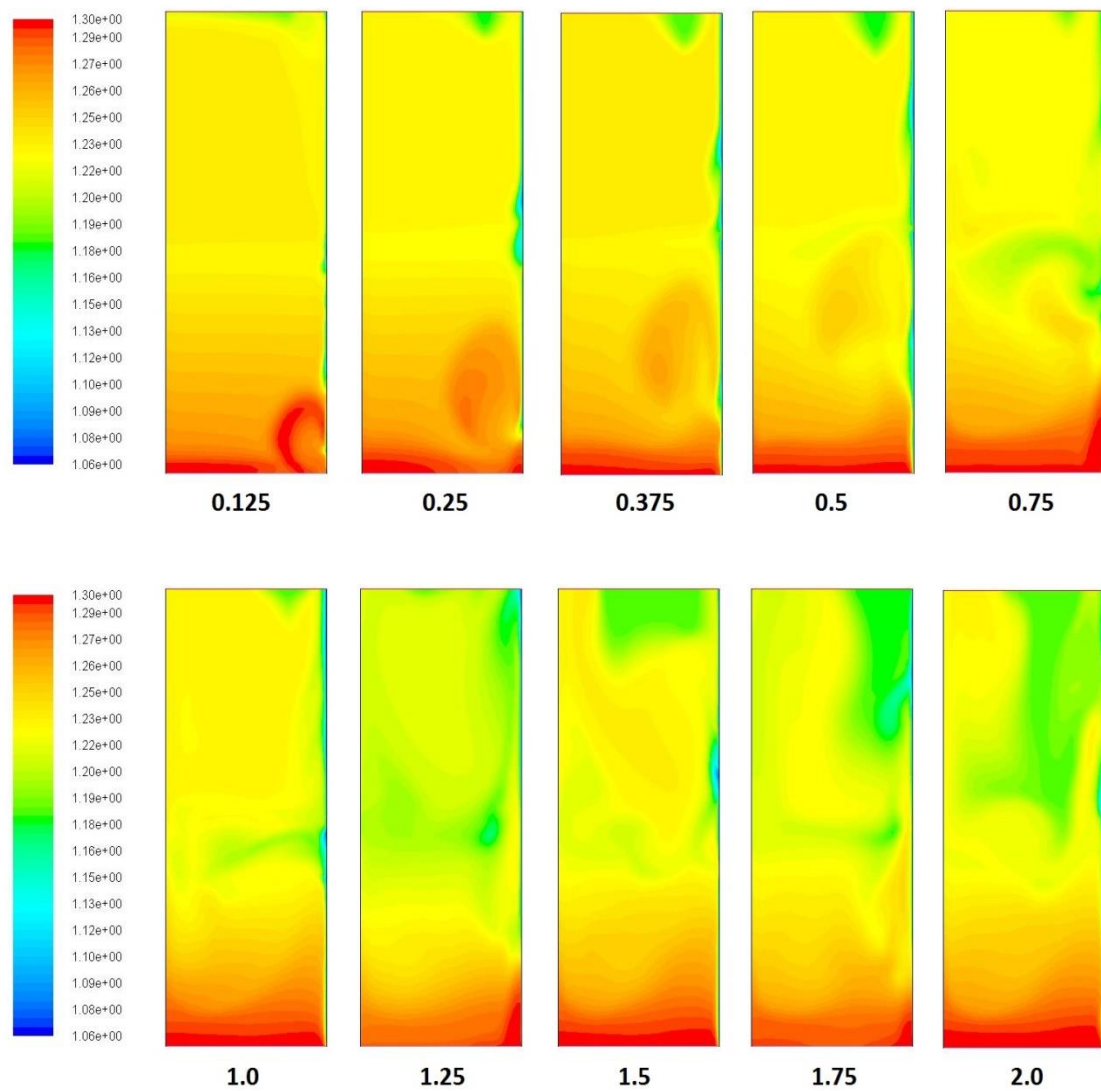


**Figura 82.** Velocidad vertical de las partículas sólidas,  $z=0.2\text{m}$ .

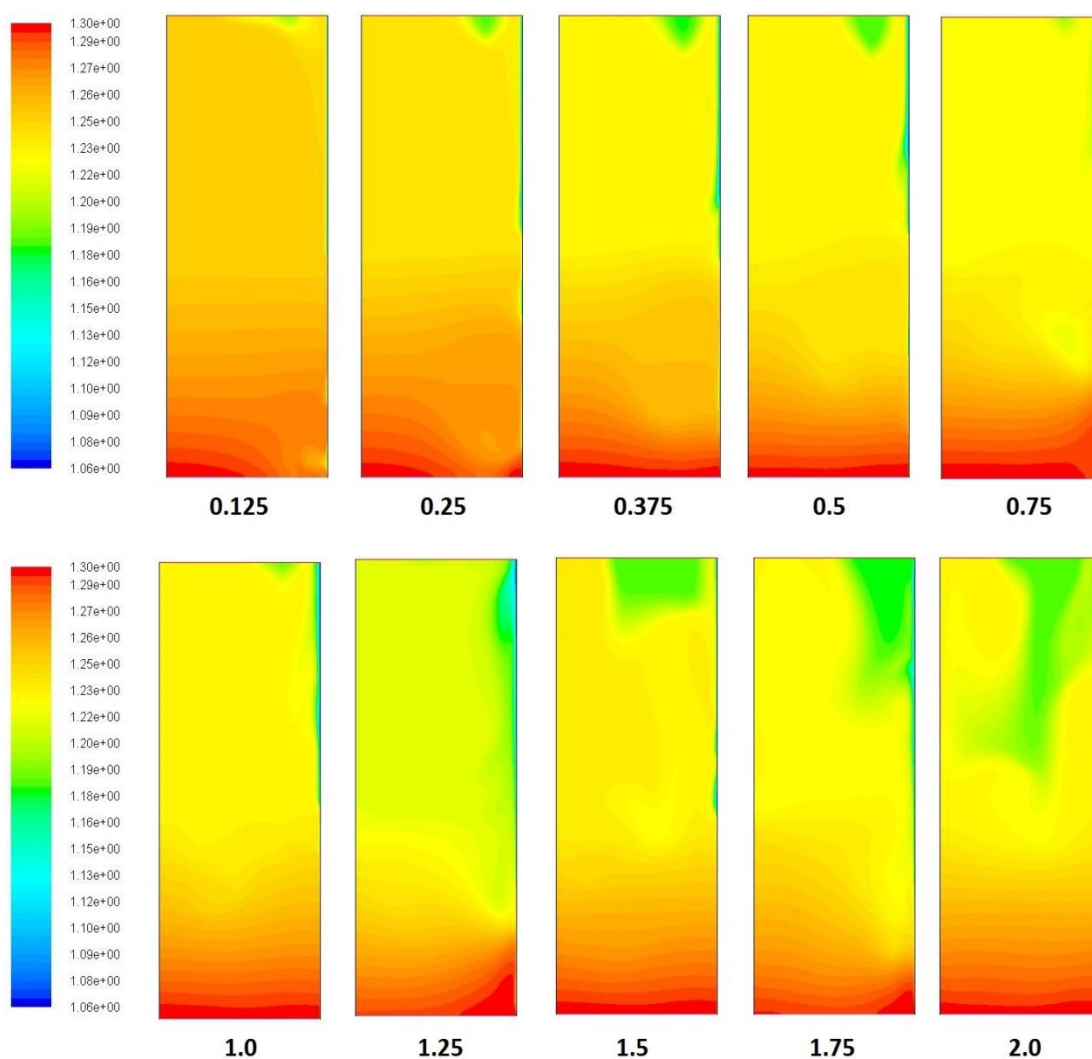
Al igual que ocurre con la velocidad vertical del aire, la velocidad vertical de las partículas sólidas, es aproximadamente igual en todos los casos (Figura 82).

#### 6.3.6. Mapas de densidad

A continuación se representarán los mapas de densidad de los casos con aire compresible, Caso 9 y Caso 10, en distintos instantes temporales de la fluidización.

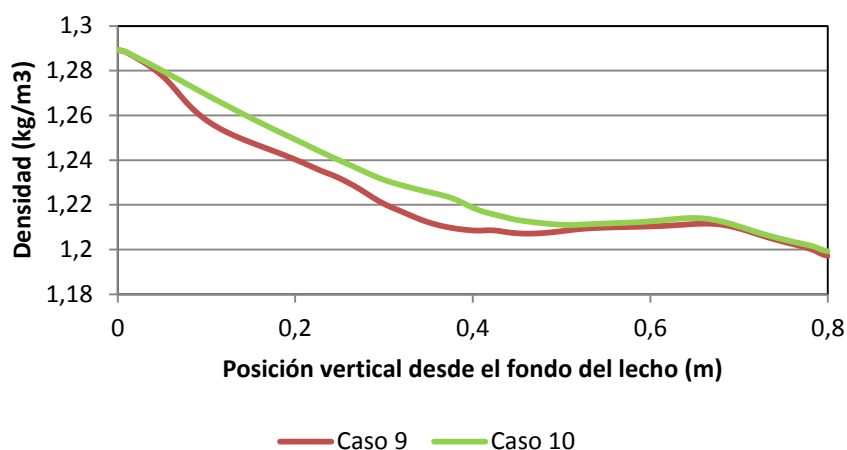


**Figura 83.** Mapas de densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ ), Caso 9.



**Figura 84.** Mapas de densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ ), Caso 10.

Como se puede observar en las imágenes (Figuras 83 y 84), el aire a mayor densidad se encuentra en el fondo del lecho, debido a que está sometido a mayores presiones. Así como los valores mínimos se encuentran en los puntos cercanos a la pared caliente, ya que la densidad decrece al aumentar la temperatura. También se puede apreciar como la densidad aumenta en las burbujas de aire con respecto a la mezcla de aire y partículas que las rodea.

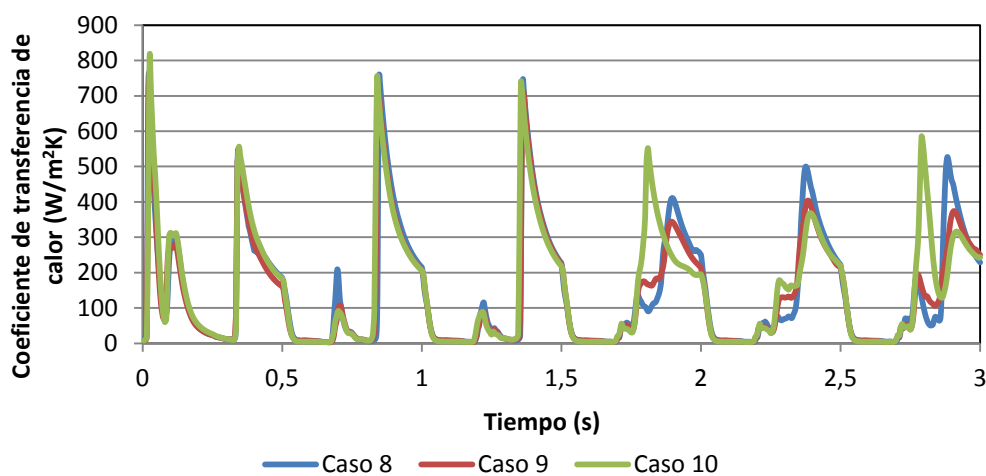


**Figura 85.** Densidad media del aire a lo largo del lecho fluidizado.

La media temporal de la densidad a lo largo de una línea de control, vertical y centrada en el lecho, muestra como la densidad del aire va disminuyendo desde el fondo del lecho hasta la superficie libre de sólidos, donde se mantiene aproximadamente constante (Figura 85).

### 6.3.7. Transferencia de calor a lo largo del tiempo

Se han tomado medidas del coeficiente de transferencia de calor,  $h$ , entre la pared a mayor temperatura y el lecho, creando un punto de control en la pared y a una altura de 0.092 m desde el fondo del lecho (Figura 86). Para el cálculo del coeficiente  $h$ , se recurre a la ecuación 3.29, el proceso de cálculo se describe en el apartado 3.9.

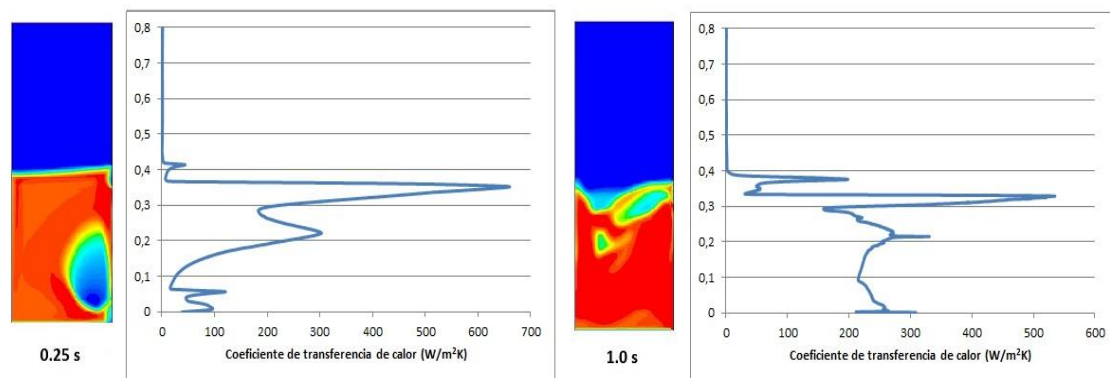


**Figura 86.** Coeficiente de transferencia de calor en función del tiempo,  $z=0.092\text{m}$ .

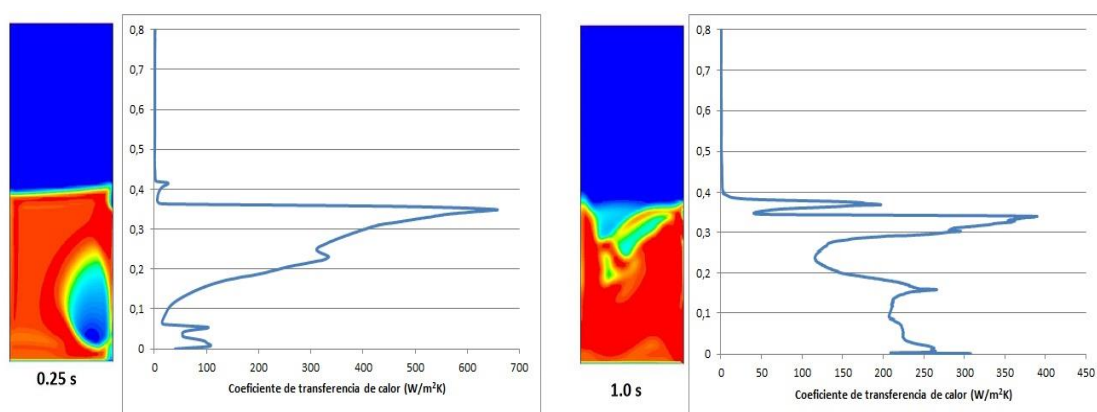
Como se puede ver en la imagen, el coeficiente de transferencia de calor es similar en los tres casos simulados, diferenciándose a partir de 1.75 segundos.

### 6.3.8. Perfiles del coeficiente de transferencia de calor

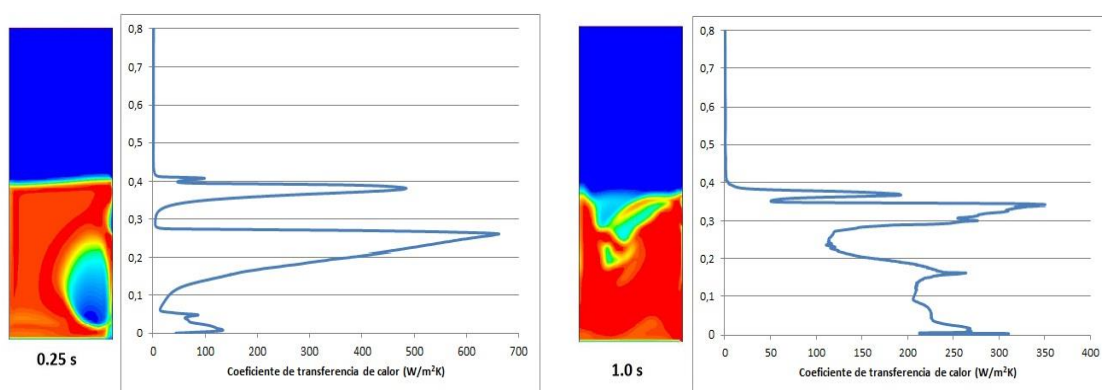
Se han elegido dos puntos temporales a partir de la gráfica anterior en los que se comprobará el coeficiente de transferencia de calor, a los 0.25 y 1 segundos. En estos puntos, se ha medido el coeficiente de transferencia de calor,  $h$ , a lo largo de la pared caliente (Figuras 87 a 89), representando el mapa de fracción volumétrica a su lado.



**Figura 87.** Perfil del coeficiente de transferencia de calor de la pared al lecho, Caso 8.

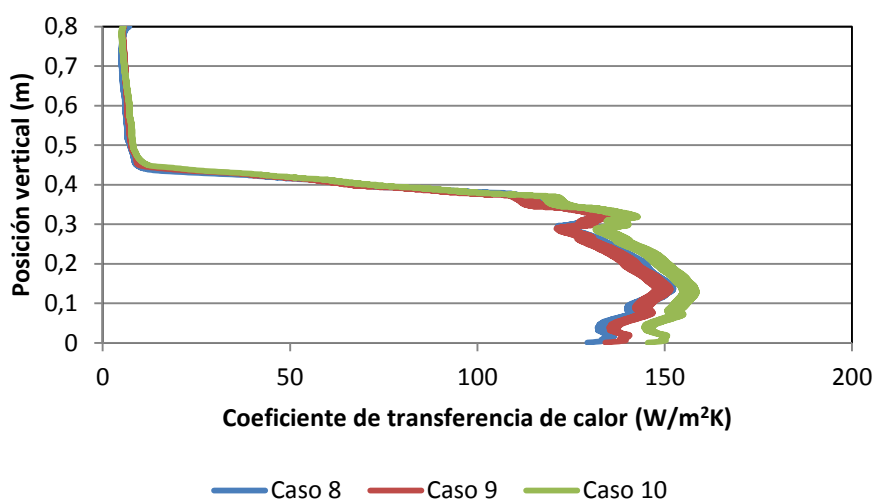


**Figura 88.** Perfil del coeficiente de transferencia de calor de la pared al lecho, Caso 9.



**Figura 89.** Perfil del coeficiente de transferencia de calor de la pared al lecho, Caso 10.

Como se puede ver, los perfiles presentan una forma similar en los tres casos. Se aprecia en las imágenes como el paso de la burbuja produce un cambio en el valor del coeficiente, debido a que el aire tiene un coeficiente de transferencia de calor menor que los sólidos.



**Figura 90.** Coeficiente de transferencia de calor medio a lo largo de la pared.

Se ha representado la media temporal del coeficiente de transferencia de calor a lo largo de la pared (Figura 90). En la imagen se puede observar como el perfil del coeficiente en el Caso 10, es un poco mayor que en el resto de casos, debido a la interacción térmica entre las partículas y el aire.

Se ha calculado la media espacial a lo largo de la pared del coeficiente de transferencia de calor, representando los valores en la Tabla 12. Se observa como el coeficiente es mayor en el Caso 10 que en los otros dos casos, donde coincide el valor.

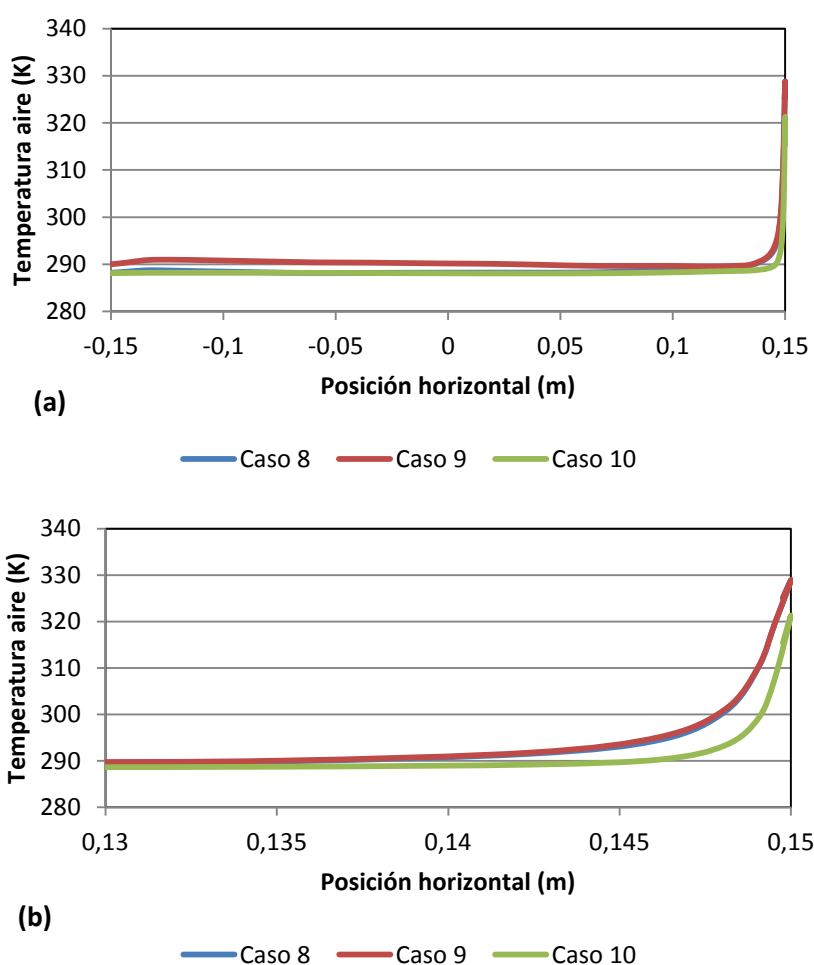
	Caso 8	Caso 9	Caso 10
$h$ (W/m <sup>2</sup> K)	71.50	71.77	76.22

**Tabla 12.** Media espacial del coeficiente de transferencia de calor.

### 6.3.9. Perfiles de temperatura

Situando una línea de control a 20 cm del fondo del lecho, se han tomado los valores medios de las temperaturas.

#### 6.3.9.1. Temperatura del aire

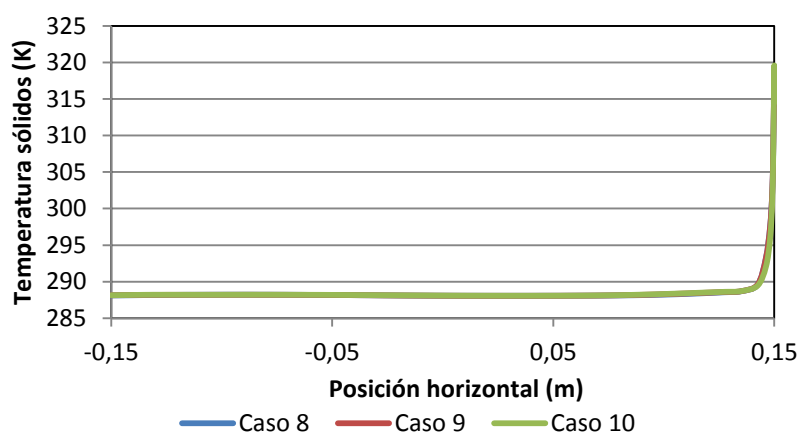


**Figura 91.** Perfiles de temperatura media del aire,  $z=0.2$  m: (a) Perfil completo, (b) Detalle cerca de la pared.

Como se puede observar en la Figura 91, la temperatura del aire es similar a lo largo de la línea de control en los tres casos. Debido a esto se realiza una ampliación del perfil cerca de la pared para poder observar el gradiente de temperaturas.

#### 6.3.9.2. Temperatura de las partículas sólidas



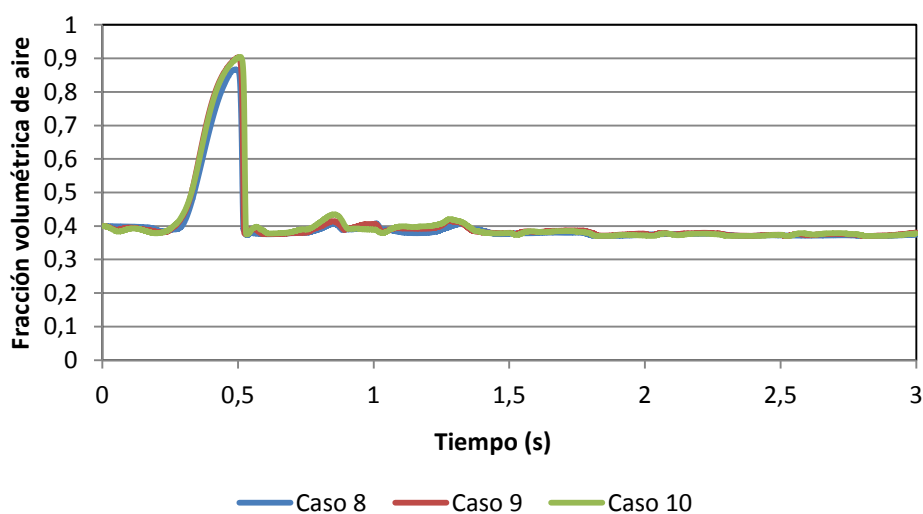


**Figura 92.** Perfiles de temperatura media de las partículas sólidas,  $z=0.2$  m.

En el caso de la temperatura de las partículas sólidas, se puede apreciar como no hay variación a lo largo del lecho, permaneciendo aproximadamente igual en los tres casos simulados (Figura 92).

#### 6.3.10. Tránsito de burbujas de aire sobre un punto de control

Al igual que en los apartados anteriores, se ha tomado un punto de control a 0.2 m del fondo del lecho y centrado en este, para comprobar el tránsito de burbujas por el punto (Figura 93).



**Figura 93.** Tránsito de burbujas de aire en un punto de control, Caso 3 y Caso 4.

Como se puede observar, en los tres casos solo ha pasado una burbuja por el punto de control. Al ser un lecho en mínima fluidización no se han producido más burbujas que las causadas por el jet pulsante, en este caso solamente la primera burbuja formada ha tenido influencia en el punto creado.

#### 6.4. Lecho burbujeante con transferencia de calor

En el apartado que sigue a continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir del cuarto bloque de simulaciones, descrito anteriormente en el apartado 5.4. Los resultados obtenidos se evaluarán de forma similar a los bloques anteriores.

La Tabla 13, resume la información de las distintas simulaciones correspondientes a este bloque.

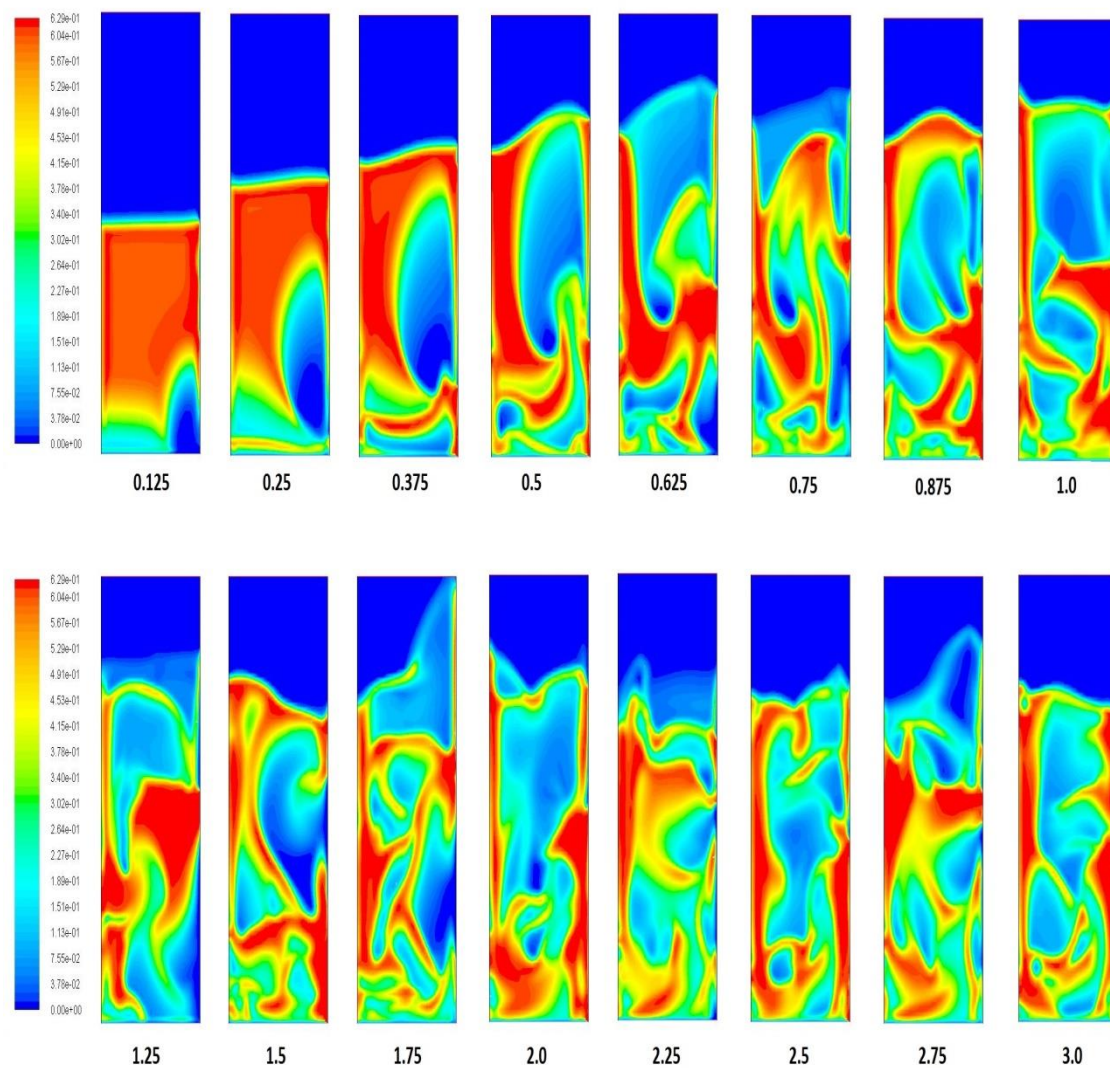
Caso	Compresibilidad del aire	Interacción térmica gas-partículas	Formulación	Paso de tiempo (s)	U (m/s)	U <sub>jet</sub> (m/s)	Tiempo de simulación (s)
11	No	No	Gidaspow	0.00025	0.5	5	3
12	Sí	No	Gidaspow	0.00025	0.5	5	3
13	Sí	Sí	Gidaspow	0.00025	0.5	5	3

**Tabla 13.** Resumen de los casos del Bloque 4.

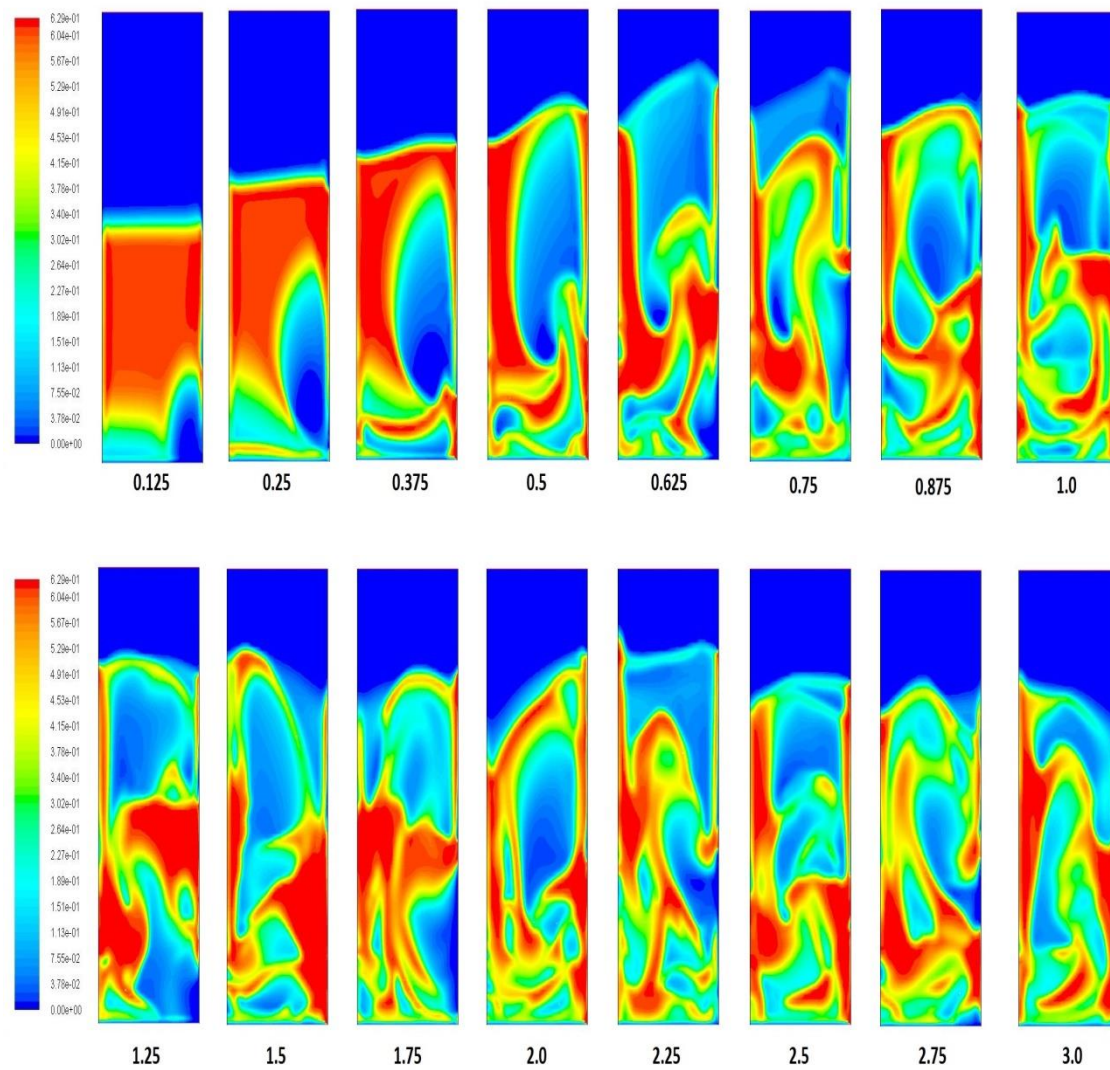
Al igual que en el bloque anterior, al incluir la salida de aire a través del jet pulsante, los valores medios temporales de todas las variables se han tomado durante toda la simulación.

##### 6.4.1. Mapas de fracción volumétrica de la fase sólida

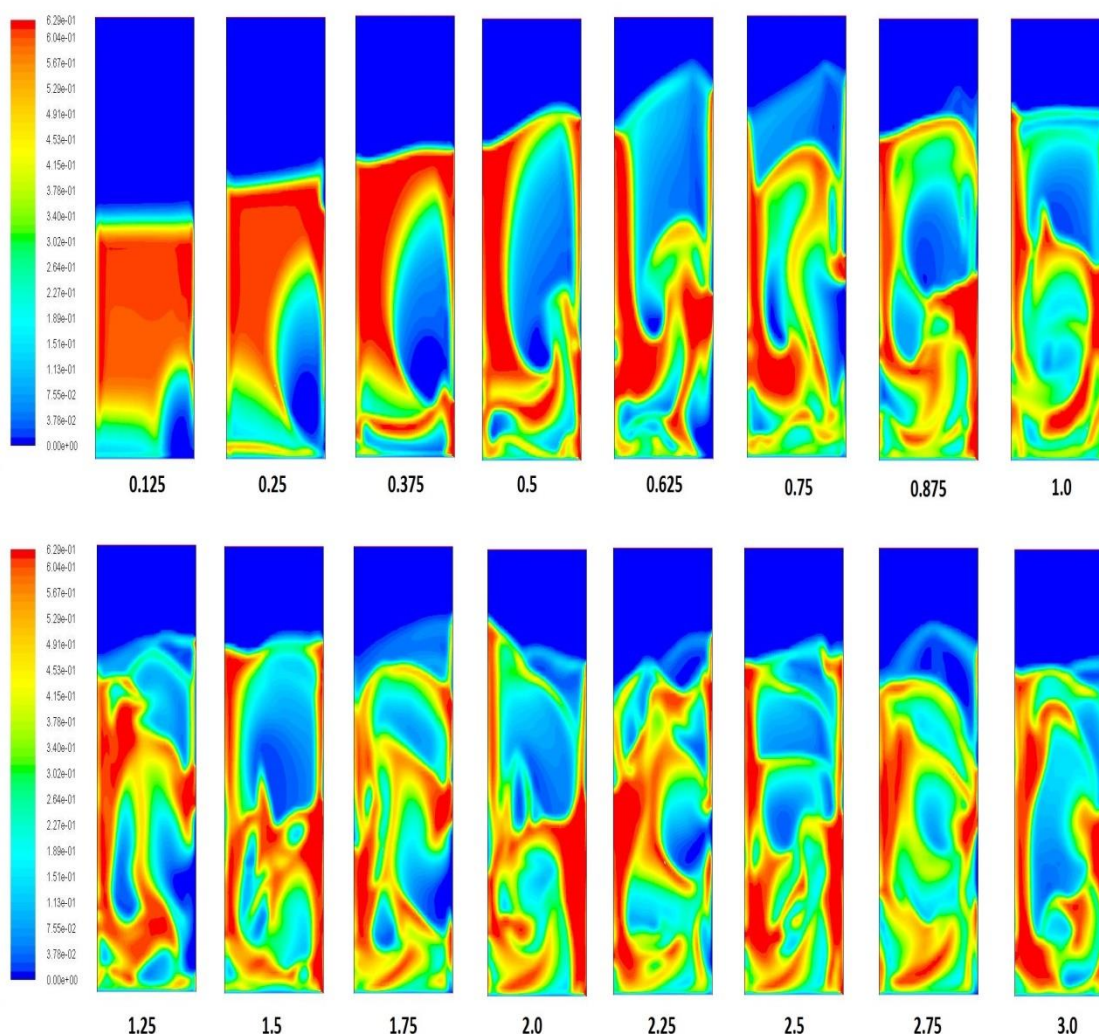
A continuación, se representan los mapas de fracción volumétrica que se han tomado a lo largo del tiempo de simulación (Figuras 94 a 96).



**Figura 94.** Mapas de fracción volumétrica de sólidos en el Caso 11.



**Figura 95.** Mapas de fracción volumétrica de sólidos en el Caso 12.



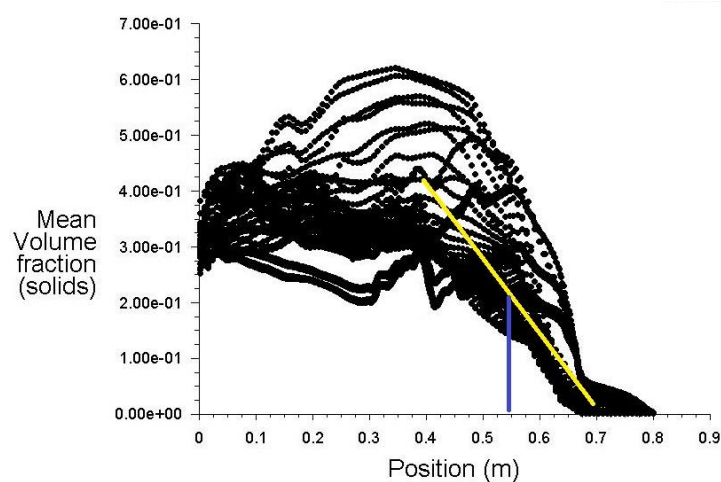
**Figura 96.** Mapas de fracción volumétrica de sólidos en el Caso 13.

Como se puede observar en las imágenes, la diferencia existente entre los casos ocurre a partir del primer segundo, correspondiendo a un tiempo en el que han roto varias burbujas en lo alto del lecho. A partir de este momento la fluidización del lecho es evidente, con un alto grado de expansión, llegando a formarse grandes burbujas.

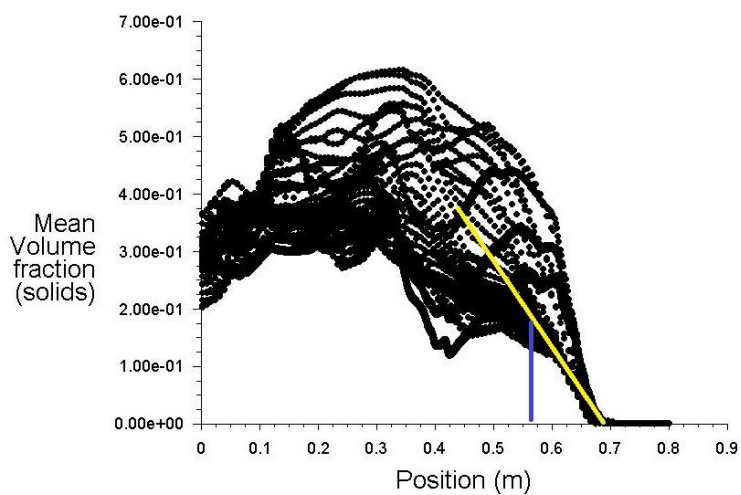
#### 6.4.2. Grado de expansión del lecho fluidizado

A continuación, se comprobará el grado de expansión del lecho fluidizado. Para representar la expansión del lecho, se ha seguido el mismo criterio que en los anteriores bloques (Figuras 97 a 99).

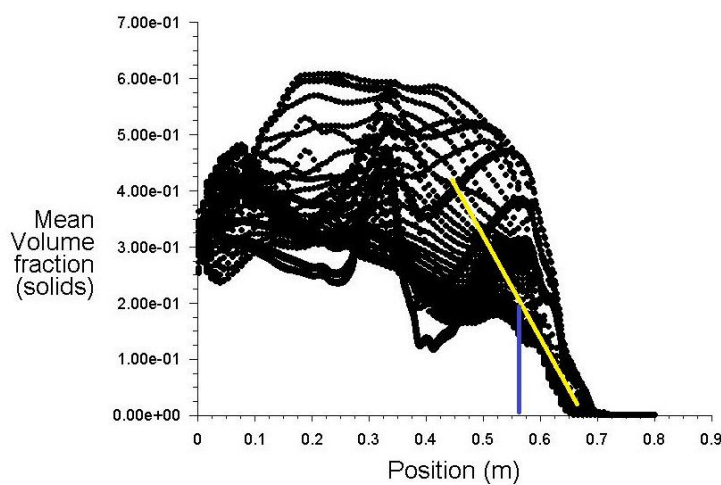




**Figura 97.** Fracción volumétrica en función de la distancia a la base del lecho, Caso 11.



**Figura 98.** Fracción volumétrica en función de la distancia a la base del lecho, Caso 12.



**Figura 99.** Fracción volumétrica en función de la distancia a la base del lecho, Caso 13.

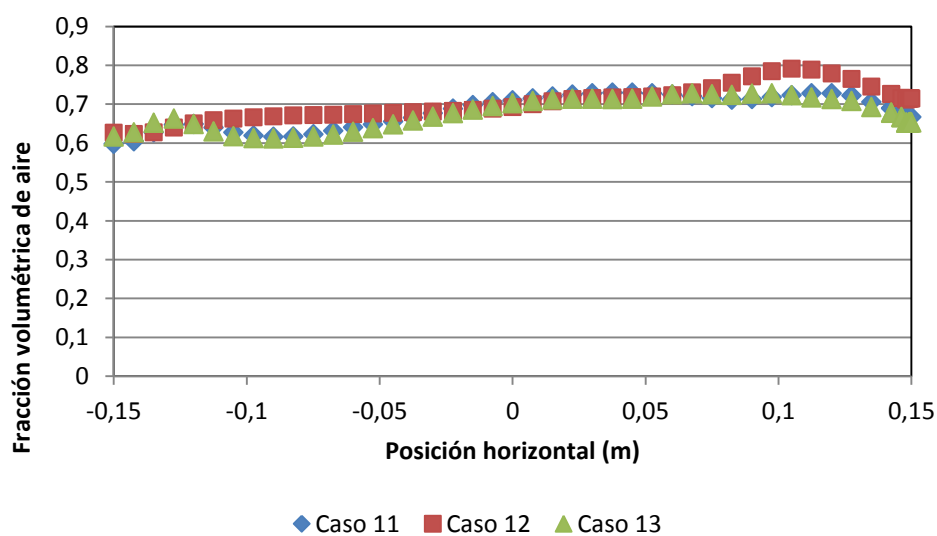
El grado de expansión del lecho en los casos de aire compresible, es mayor al caso con aire incompresible, los resultados se muestran en la siguiente tabla (Tabla 14).

	Caso 11	Caso 12	Caso 13
$H/H_0$	1.557	1.611	1.607

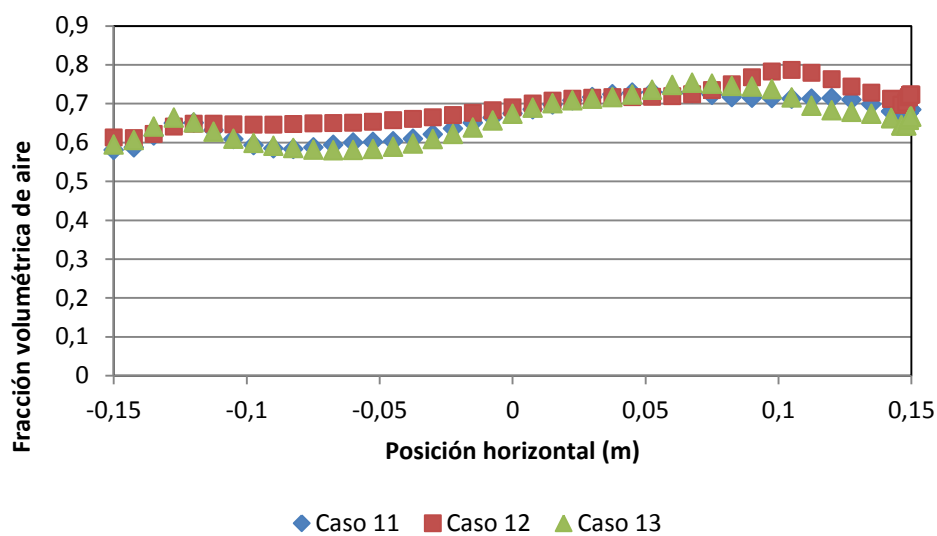
**Tabla 34.** Grado de expansión.

#### 6.4.3. Aparición de burbujas de aire

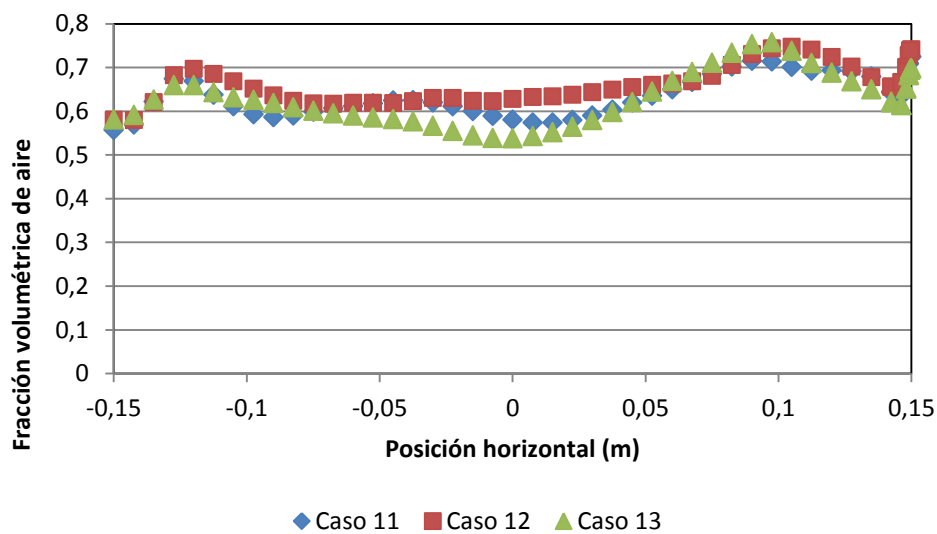
A través de las líneas de control creadas a distintas alturas a lo largo del lecho (1, 2, 5, 10, 15 y 20 cm), se va a proceder a controlar las burbujas que han pasado a través del lecho (Figuras 100 a 105).



**Figura 100.** Fracción volumétrica de aire,  $z=0.01m$ .

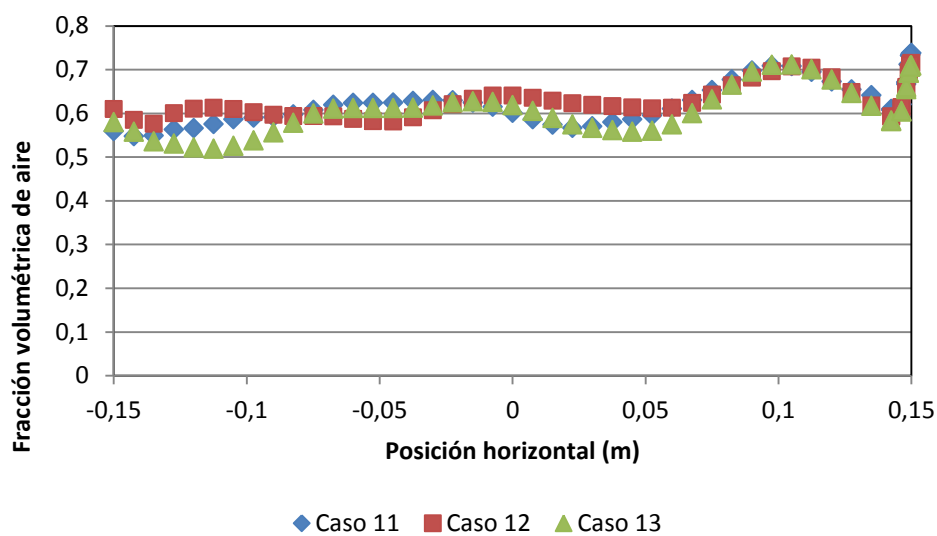


**Figura 101.** Fracción volumétrica de aire,  $z=0,02\text{m}$ .

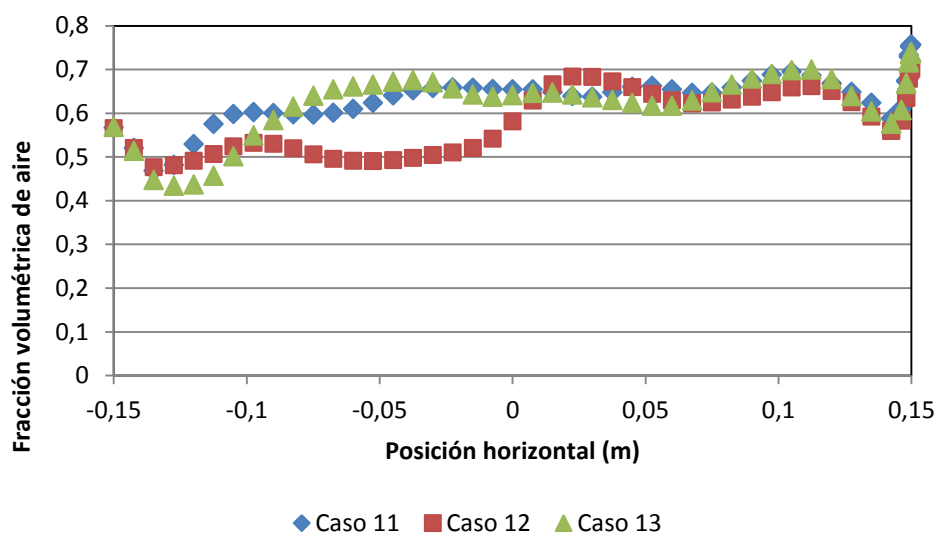


**Figura 102.** Fracción volumétrica de aire,  $z=0,05\text{m}$ .

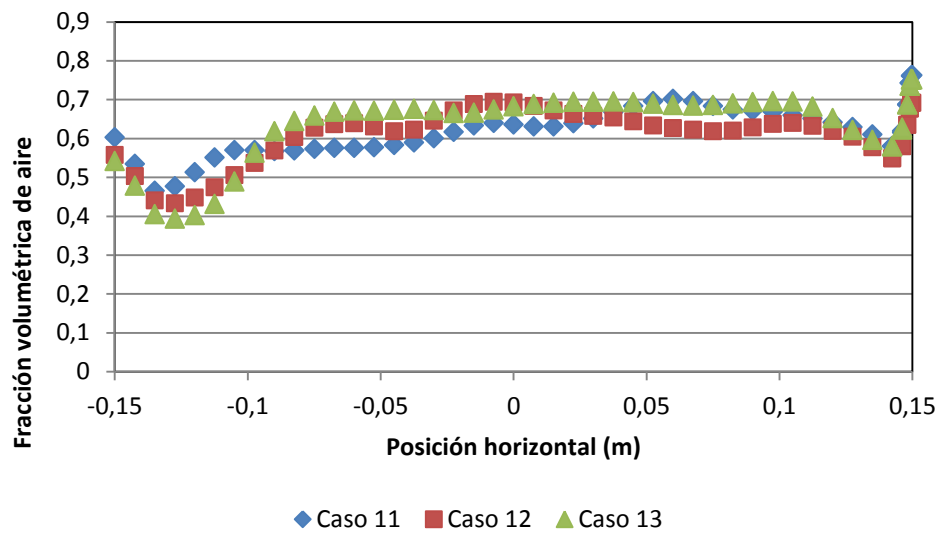




**Figura 103.** Fracción volumétrica de aire,  $z=0.10\text{m}$ .



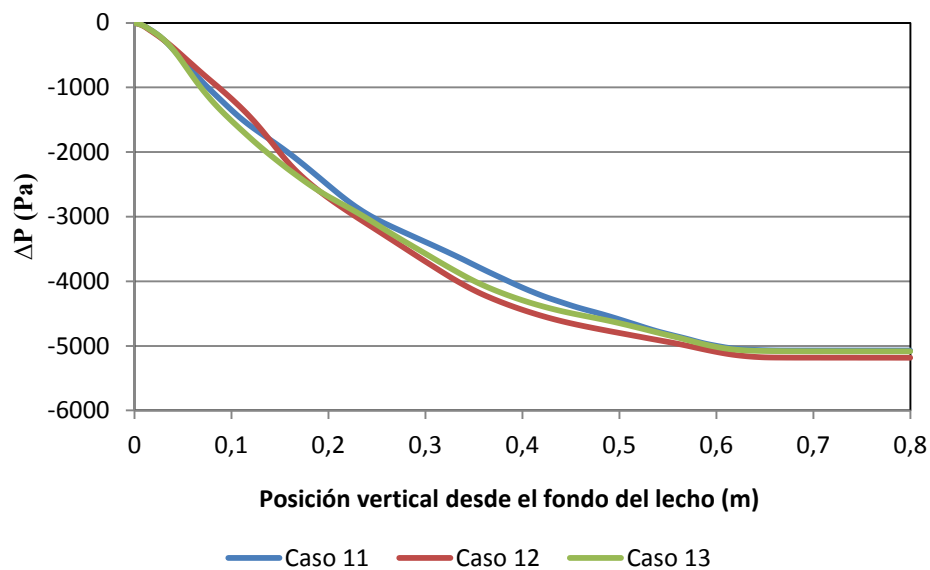
**Figura 104.** Fracción volumétrica de aire,  $z=0.15\text{m}$ .



**Figura 105.** Fracción volumétrica de aire,  $z=0.20\text{m}$ .

La fracción volumétrica mostrada en las imágenes, es aproximadamente similar en los tres casos, siendo el Caso 13, el que muestra unos valores más constantes en las líneas de control situadas a distintas alturas.

#### 6.4.4. Caída de presión en el lecho



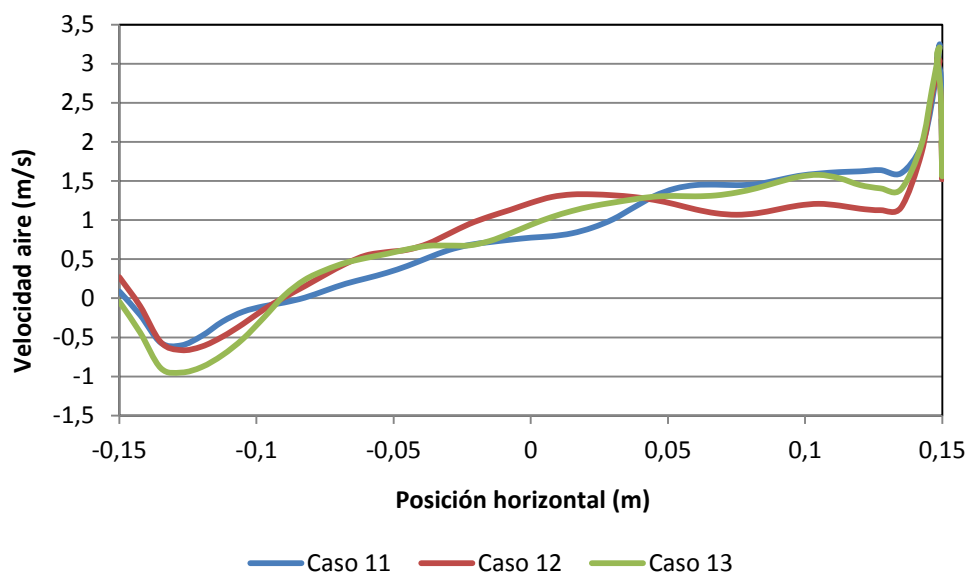
**Figura 106.** Caída de presión en la columna del lecho.

La caída de presión en el lecho es aproximadamente igual en los tres casos, la diferencia de presión va aumentando desde el fondo del lecho a lo largo de la fase sólida hasta que se vuelve constante en la superficie libre de partículas (Figura 106).

#### 6.4.5. Perfiles de velocidades

Situando una línea de control a 20 cm del fondo del lecho, se han obtenido las velocidades medias sobre esta línea.

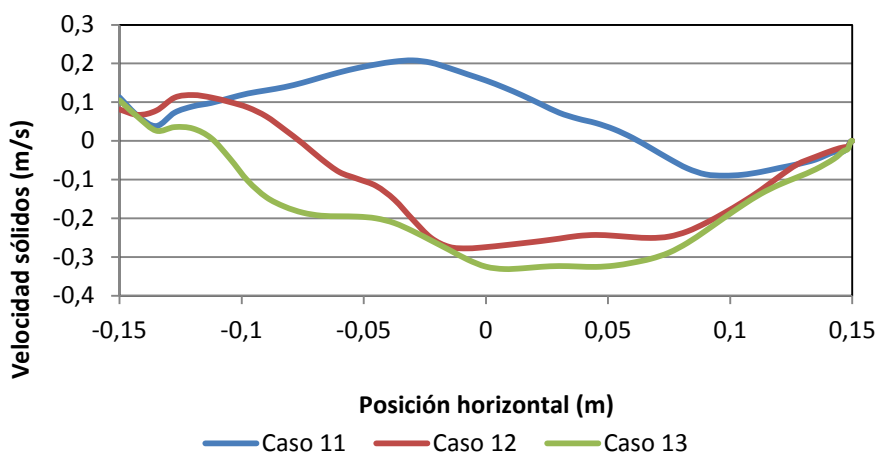
##### 6.4.5.1. Velocidad del aire



**Figura 107.** Velocidad vertical del aire,  $z=0.2\text{m}$ .

Como se observa en la Figura 107, las velocidades del aire en los tres casos son muy similares. Se puede ver como la velocidad es máxima en un punto cercano a la pared a mayor temperatura, donde tiene influencia la entrada de aire a gran velocidad. Además de esto, se puede apreciar como la velocidad va disminuyendo desde el centro del lecho hasta acercarse a la pared de la izquierda, llegando a tener valores negativos.

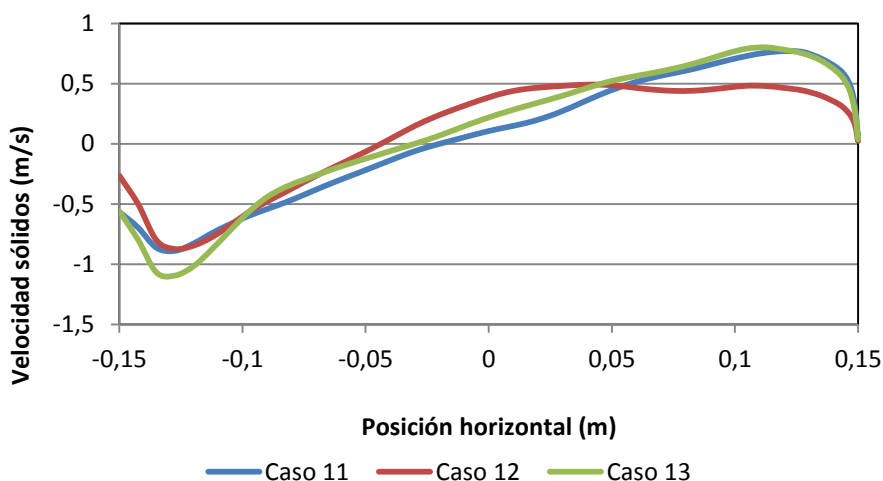
#### 6.4.5.2. Velocidad horizontal de los sólidos



**Figura 108.** Velocidad horizontal de las partículas sólidas,  $z=0.2\text{m}$ .

Como se puede observar, el perfil de velocidades es muy diferente entre los tres casos (Figura 108). Mientras en los casos con aire compresible, la velocidad es negativa a lo largo del lecho. En el caso con aire incompresible, ocurre lo contrario, la velocidad es positiva en el lecho, excepto en las cercanías de la pared caliente, que se vuelve negativa.

#### 6.4.5.3. Velocidad vertical de los sólidos

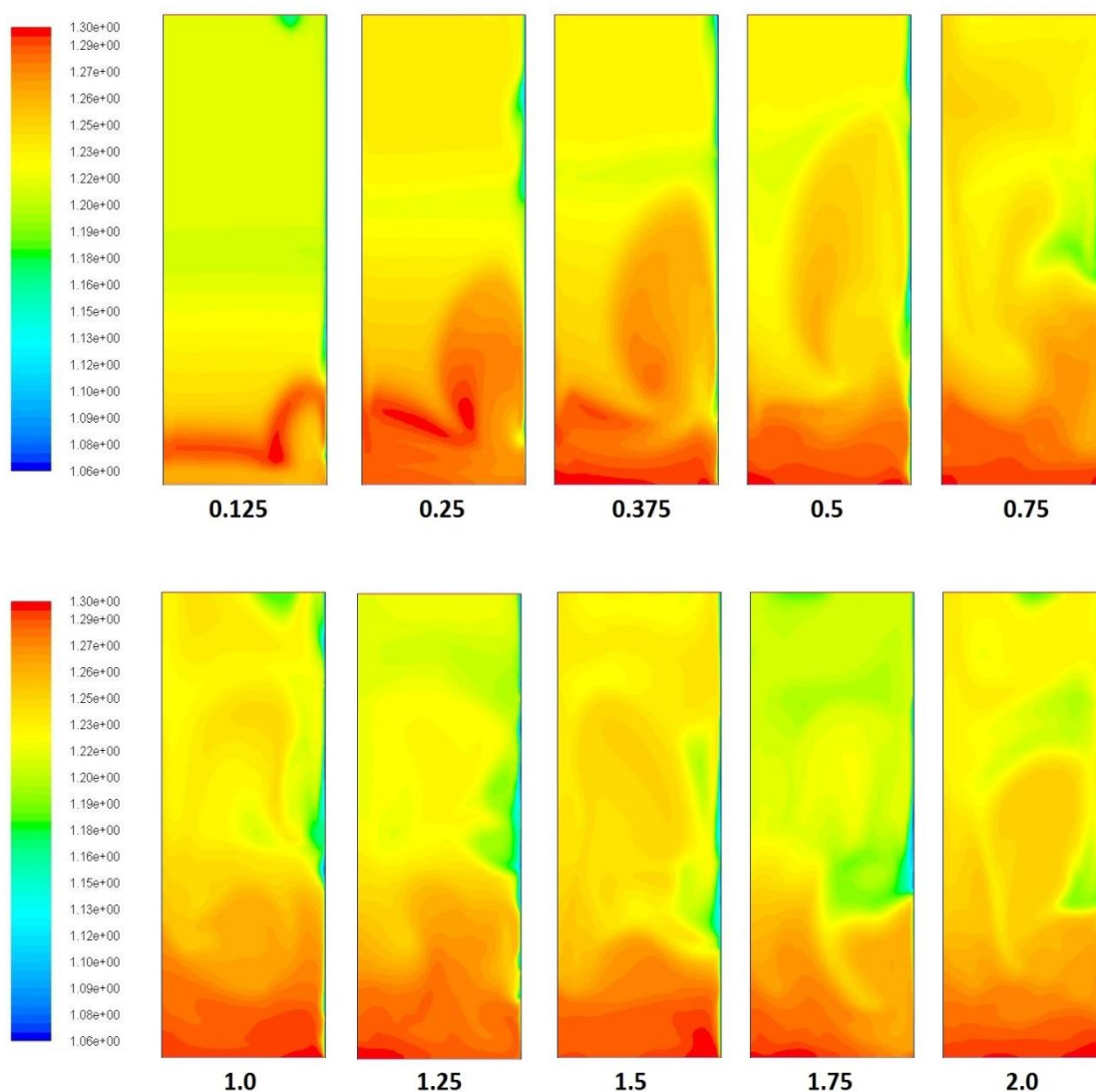


**Figura 109.** Velocidad vertical de las partículas sólidas,  $z=0.2\text{m}$ .

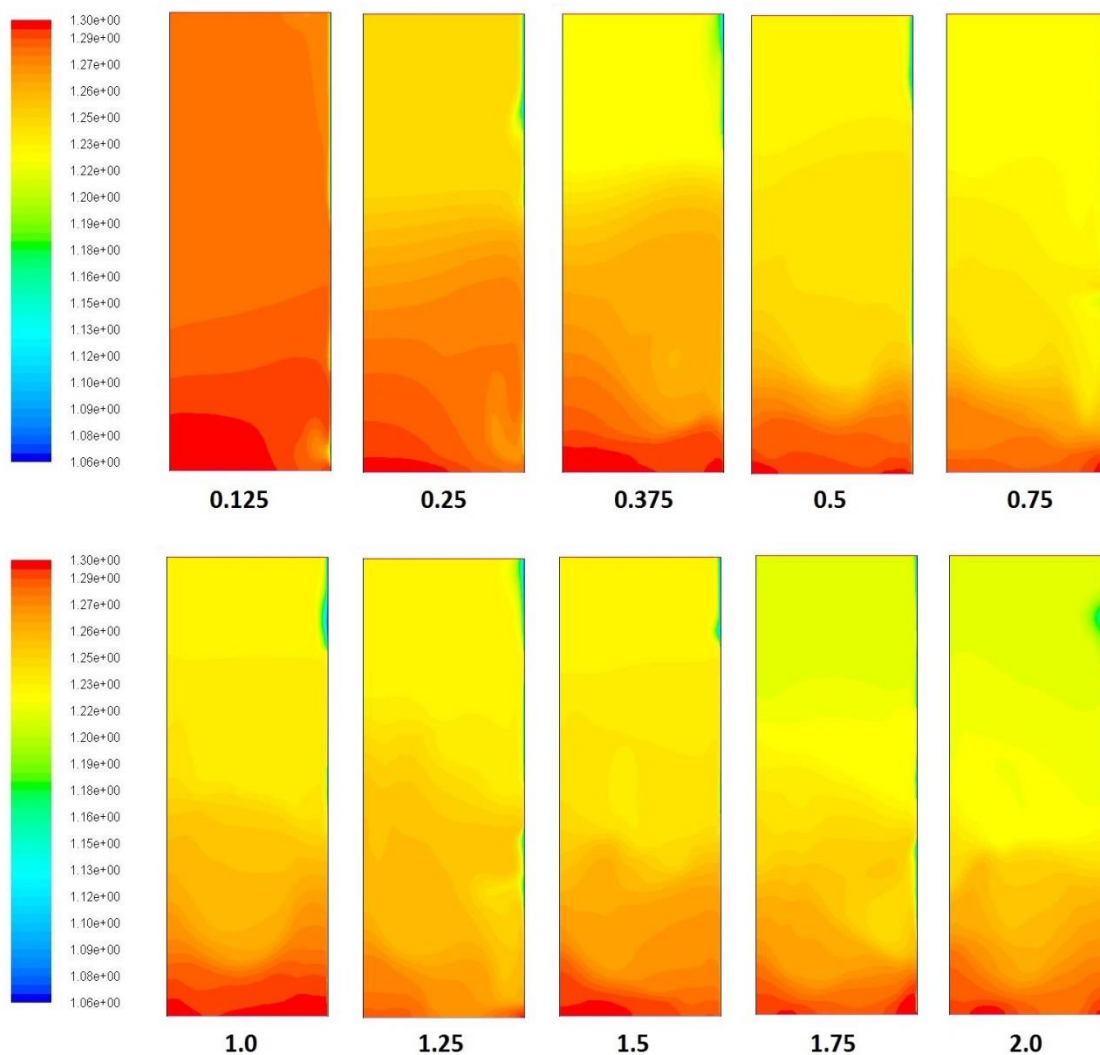
De forma similar a lo que ocurre con la velocidad vertical del aire, la velocidad vertical de las partículas sólidas, con pequeñas diferencias, tiene un mismo perfil en los tres casos (Figura 109).

#### 6.4.6. Mapas de densidad

A continuación se representarán los mapas de densidad de los casos con aire compresible, Caso 12 y Caso 13, en distintos instantes temporales de la fluidización (Figuras 110 y 111).

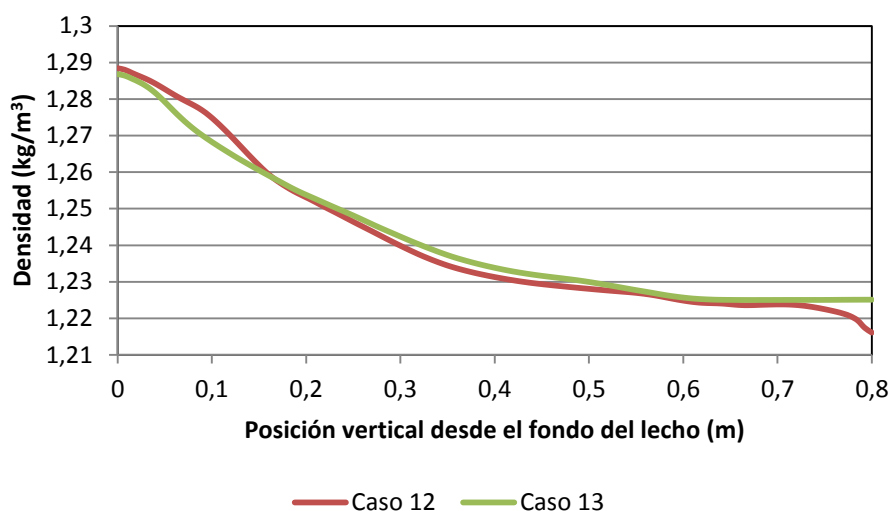


**Figura 110.** Mapas de densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ ), Caso 12.



**Figura 111.** Mapas de densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ ), Caso 13.

Al igual que en los casos anteriores, el aire con mayor densidad se encuentra en el fondo del lecho y el aire con menor densidad se encuentra cercano a la pared caliente, debido a la influencia de la temperatura. De nuevo, se vuelve a observar como la densidad aumenta en las burbujas de aire con respecto a la mezcla de aire y partículas que las rodea.

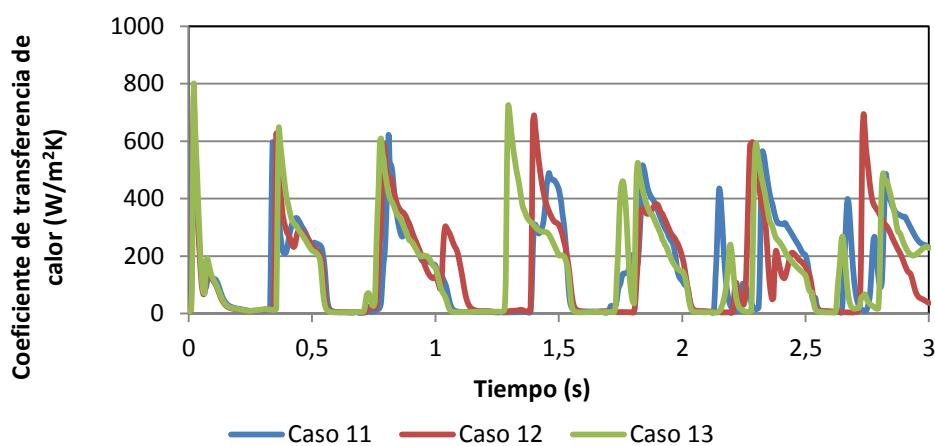


**Figura 112.** Densidad media del aire a lo largo del lecho fluidizado.

Al igual que en los casos anteriores, la media de la densidad del aire, va disminuyendo desde el fondo del lecho, a lo largo de la línea de control creada, hasta la superficie libre de sólidos (Figura 112).

#### 6.4.7. Transferencia de calor a lo largo del tiempo

Tomando medidas del coeficiente de transferencia de calor,  $h$ , entre la pared caliente y el lecho, se ha creado un punto de control a una altura de 0.092 m desde el fondo del lecho (Figura 113).

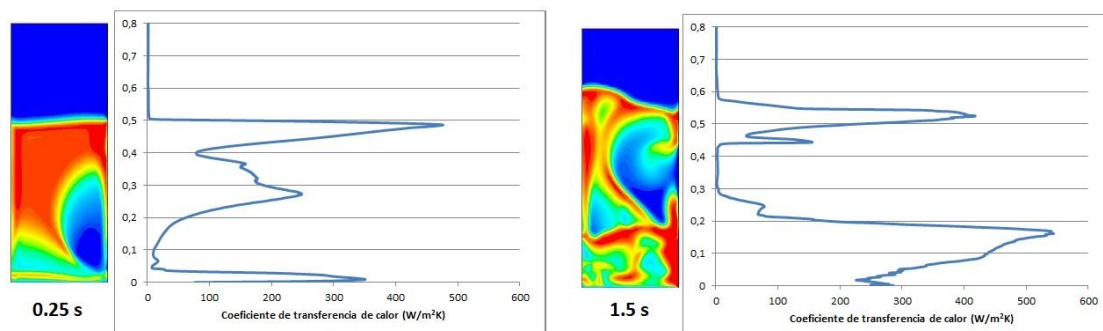


**Figura 113.** Coeficiente de transferencia de calor en función del tiempo,  $z=0.092\text{m}$ .

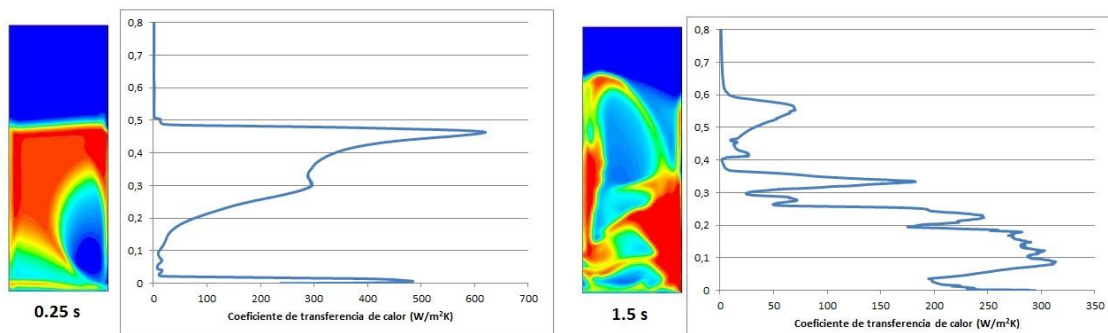
Como se puede observar, al inicio de la fluidización, el coeficiente de transferencia de calor es similar en los tres casos, según comienza la fluidización se empiezan a apreciar las diferencias. El coeficiente en el caso con aire incompresible, es menor en los valores pico. Además estos valores pico se suceden a distinto tiempo que en los casos con aire compresible.

#### 6.4.8. Perfiles del coeficiente de transferencia de calor

Al igual que en el bloque anterior, se han elegido dos puntos temporales a partir del gráfico anterior, estos puntos son 0.25 y 1.5 segundos. En estos puntos se ha vuelto a valorar el coeficiente de transferencia de calor desde la pared al lecho, a lo largo de toda la pared (Figuras 114 a 116).

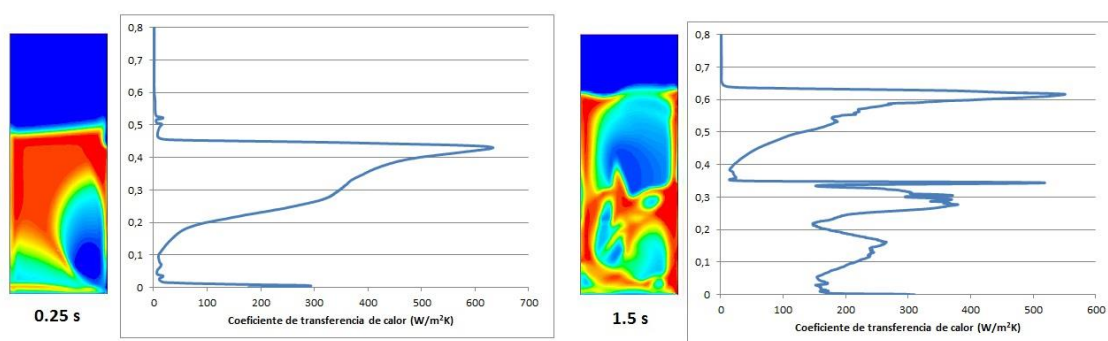


**Figura 114.** Perfil del coeficiente de transferencia de calor de la pared al lecho, Caso 11.



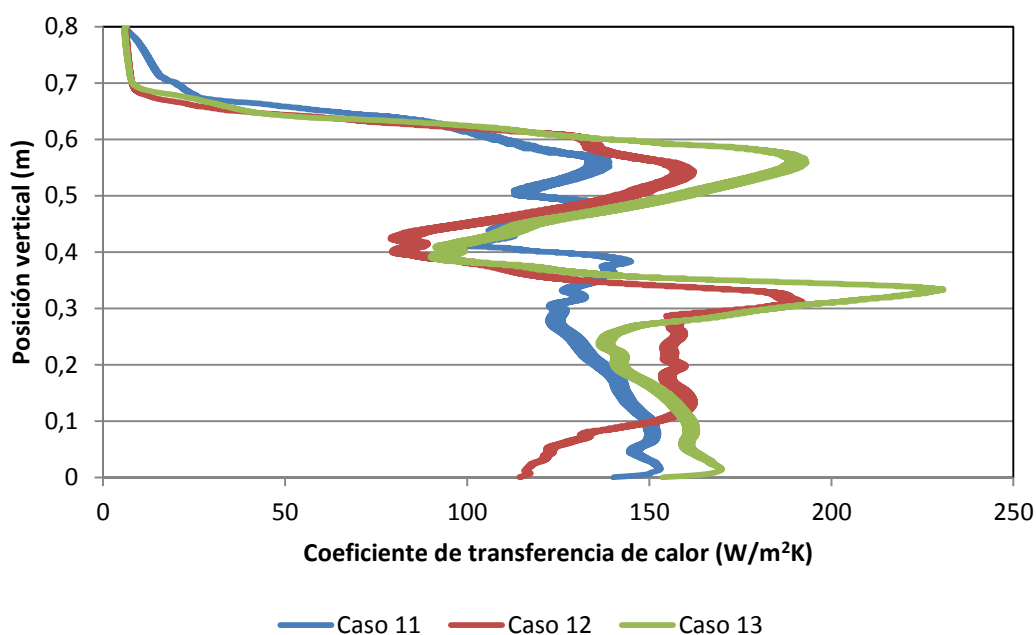
**Figura 115.** Perfil del coeficiente de transferencia de calor de la pared al lecho, Caso 12.





**Figura 116.** Perfil del coeficiente de transferencia de calor de la pared al lecho, Caso 13.

Como se puede observar en las imágenes, el coeficiente de transferencia de calor coincide en el primer punto temporal. Sin embargo, en el instante 1.5 segundos, el coeficiente varía entre los casos, dependiendo de si hay más concentración de aire o de sólidos cerca de la pared.



**Figura 117.** Media temporal del coeficiente de transferencia de calor a lo largo de la pared.

Al igual que en el apartado anterior, se han tomado valores medios temporales del coeficiente de transferencia de calor a lo largo de la pared (Figura 117). Se observa, como los perfiles difieren y además como el Caso 13, alcanza valores mayores que los otros dos casos.

En la Tabla 15, se han representado los valores medios espaciales a lo largo de la pared del coeficiente de transferencia de calor. Se observa, que el valor obtenido en el Caso 13 es mayor que en los otros dos casos.

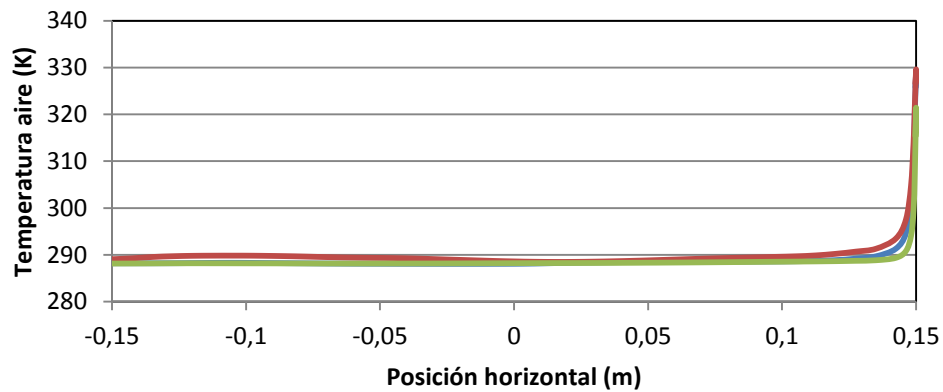
	Caso 11	Caso 12	Caso 13
$h$ (W/m <sup>2</sup> K)	108.69	111.82	123.46

Tabla 15. Media espacial del coeficiente de transferencia de calor.

#### 6.4.9. Perfiles de temperatura

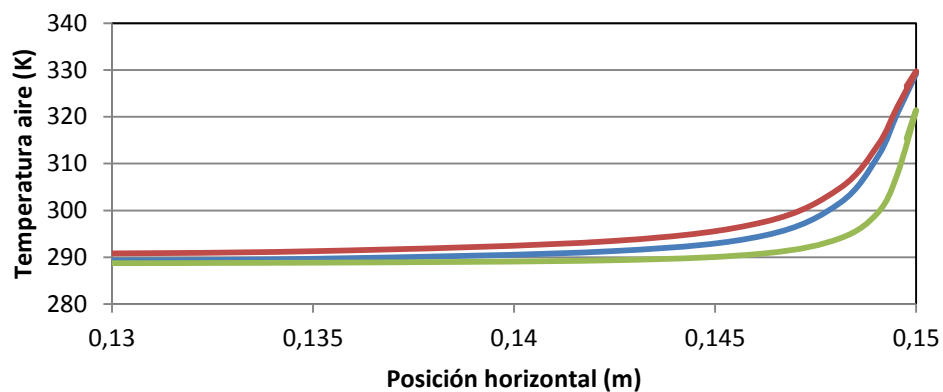
A continuación, se va a representar la temperatura media, tanto del aire como de las partículas sólidas, sobre una línea de control situada a 20 cm del fondo del lecho.

##### 6.4.9.1. Temperatura del aire



(a)

— Caso 11 — Caso 12 — Caso 13



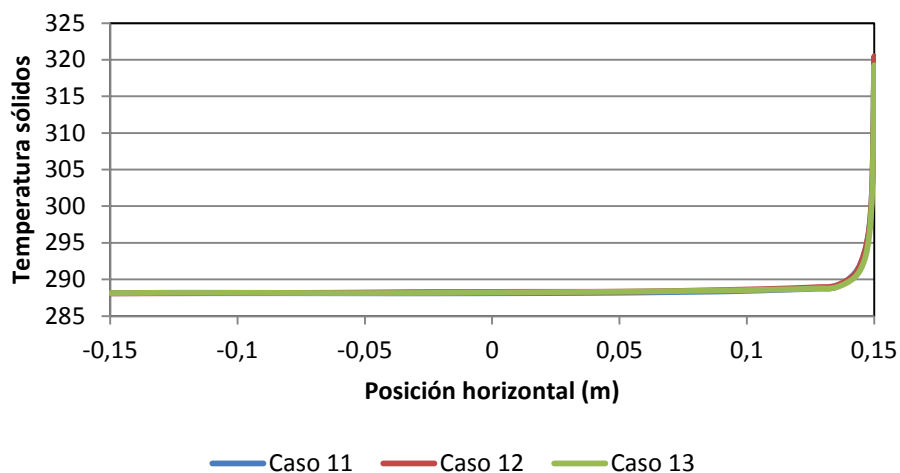
(b)

— Caso 11 — Caso 12 — Caso 13

Figura 118. Perfiles de temperatura media del aire,  $z=0.2$  m: (a) Perfil completo, (b) Detalle cerca de la pared

La temperatura media del aire a lo largo del lecho, no difiere mucho entre los tres casos (Figura 118). Se puede observar como en el Caso 12, es ligeramente superior a lo largo de la línea de control. Al realizar la ampliación en las cercanías de la pared, se aprecia el gradiente de temperaturas de los tres casos.

#### 6.4.9.2. Temperatura de las partículas sólidas

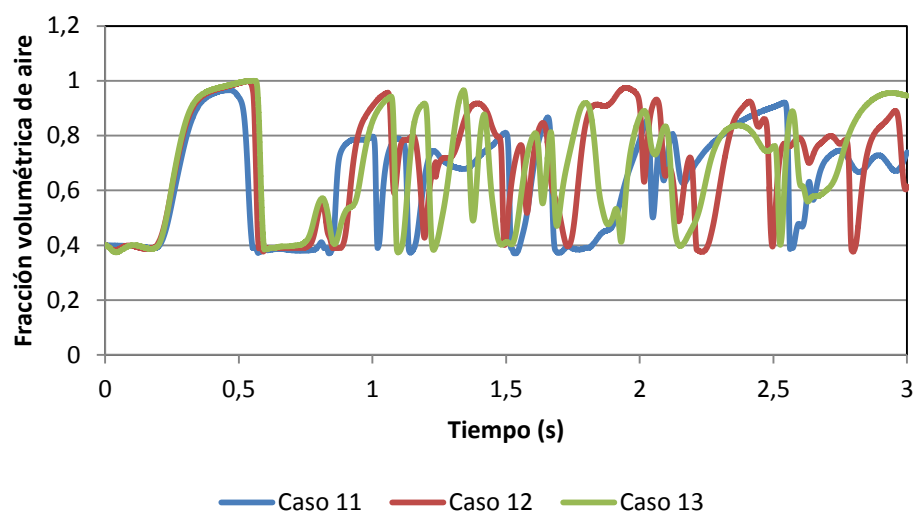


**Figura 119.** Perfiles de temperatura de las partículas sólidas,  $z=0.2$  m.

Como se puede observar en la Figura 119, la temperatura de los sólidos, no varía entre los tres casos simulados.

#### 6.4.10. Tránsito de burbujas de aire sobre un punto de control

Tomando un punto de control a 0.2 m del fondo del lecho y centrado en este, se han obtenido las fracciones volumétricas de aire para comprobar el tránsito de burbujas por el punto (Figura 120).



**Figura 120.** Tránsito de burbujas de aire en un punto de control, Caso 10 y Caso 11.

Como se puede observar, el tránsito de burbujas ha sido muy alto, ya que no existen muchos puntos en los que la fracción volumétrica esté en su valor mínimo. A su vez, en los casos con aire compresible, las burbujas están más desarrolladas y tienen un menor contenido en partículas, como indican los valores pico de la fracción volumétrica.



## 7. CONCLUSIONES

### 7.1. Resumen de tareas realizadas

Las fases en las que se ha desarrollado el presente proyecto y sus correspondientes tareas, han sido las siguientes:

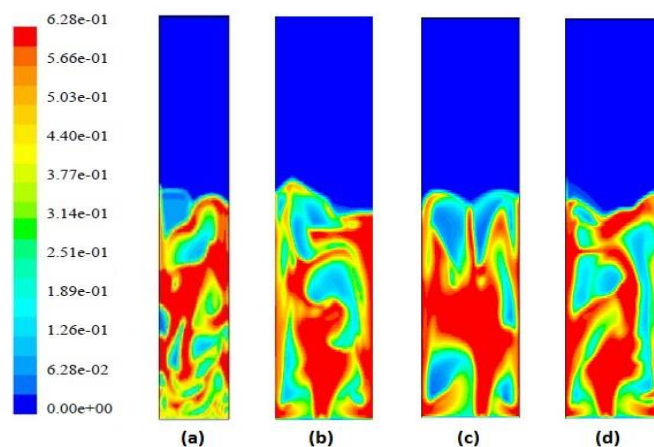
1. Búsqueda de documentación y bibliográfica para el aprendizaje del campo de los lechos fluidizados.
2. Introducción al manejo del software comercial ANSYS Fluent y a la simulación CFD de lechos fluidizados mediante la reproducción de ejemplos disponibles en la ayuda tutorial del programa.
3. Reproducción y comparación de un estudio computacional ya realizado de un lecho fluidizado. Evaluación del modelo de formulación a seguir.
4. Incorporación de la compresibilidad del aire en el estudio de un lecho fluidizado. Evaluación y comparación de los resultados entre los casos.
5. Incorporación de la transferencia de calor en el lecho fluidizado con burbujeo parcial. Evaluación y comparación de los resultados entre los casos.
6. Unión de los casos anteriores para el estudio de un lecho completamente burbujeante con transferencia de calor. Evaluación y comparación de los resultados entre los casos.
7. Comparación de los resultados entre los casos de los distintos bloques.

### 7.2. Principales resultados

En este apartado, se mostrarán los principales resultados obtenidos durante la realización del proyecto. Debido a que solo se comentarán los resultados más relevantes, para conocer con mayor profundidad el resto de resultados se remite al tema 6.

#### 7.2.1. Desarrollo y comparación de un estudio computacional sobre un lecho fluidizado

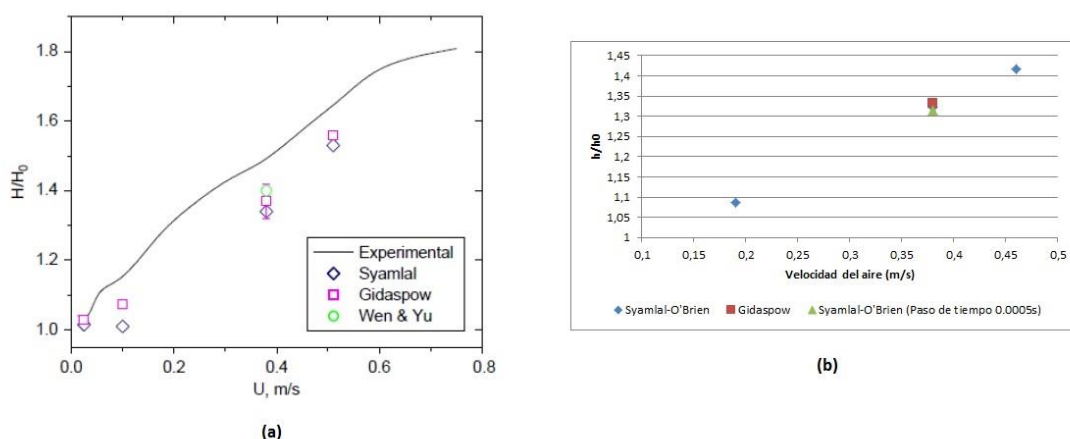
En primer lugar, se evalúa el estado de la fluidización en función del modelo de ecuaciones utilizado, Syamlal-O'Brien o Gidaspow, según la fracción volumétrica de partículas sólidas en distintos instantes temporales y el grado de expansión del lecho, apartados 6.1.1 y 6.1.2.



**Figura 121.** Mapas de fracción volumétrica de sólidos ( $t=3s$ ).

Según los resultados expresados en la Figura 121, se ha comprobado cómo la formulación Gidaspow (c) produce un lecho más estable, con burbujas uniformes, bien definidas y de un tamaño mayor que en los casos con formulación Syamlal-O'Brien ((b) y (d)). Se aprecia como las simulaciones, tienen un perfil igual de definido que el caso publicado por Taghipour y colaboradores (a).

Respecto a la relación entre el grado de expansión del lecho en función de la velocidad de entrada del aire (Figura 122), se puede apreciar cómo la expansión en las simulaciones obtenidas en el estudio de la U.B.C. (a) es mayor que la expansión que se ha obtenido en las simulaciones del presente proyecto (b).



**Figura 122.** Grado de expansión del lecho en función de la velocidad del aire.

Como siguiente paso, se evalúa el perfil de velocidades (apartado 6.1.5), ya que la velocidad de las partículas sólidas es un parámetro importante en cualquier proceso

que emplee lechos fluidizados. Comparando los resultados (Figura 123), se aprecia cómo el perfil obtenido por la U.B.C. no forma un perfil realista, debido a que no se aprecian velocidades negativas en el lecho. Este resultado no debería darse, puesto que las partículas sólidas en su movimiento dentro del lecho, tienen tanto velocidades medias positivas como negativas pues existe una recirculación medio de partículas dentro del lecho fluidizado. Debido a esto, el perfil obtenido en las simulaciones (b), se puede considerar como un perfil más realista.

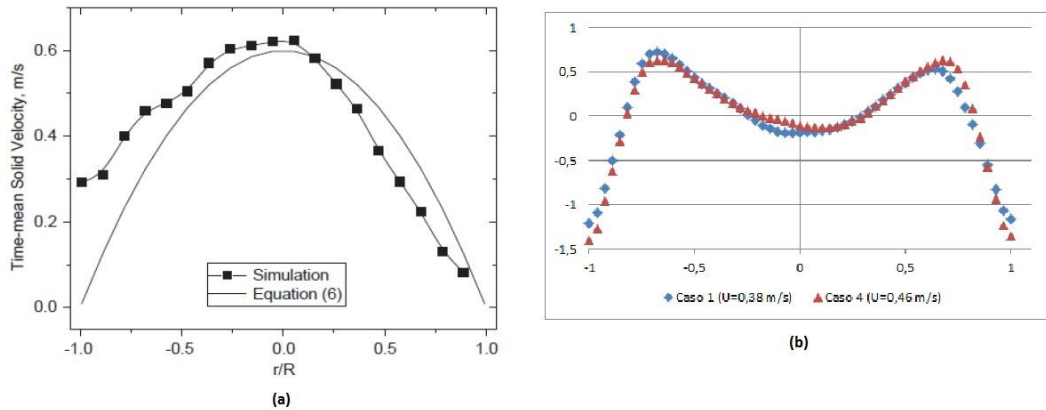


Figura 123. Velocidad de las partículas sólidas a 20 cm del fondo del lecho.

### 7.2.2. Incorporación de la incompresibilidad

Teniendo un modelo de ecuaciones definido, se evalúa el estado de la fluidización en el caso con aire compresible en comparación con el caso con aire incompresible. Los resultados obtenidos de la fracción volumétrica de los sólidos y el grado de expansión del lecho se presentan en los apartados 6.2.1 y 6.2.2.

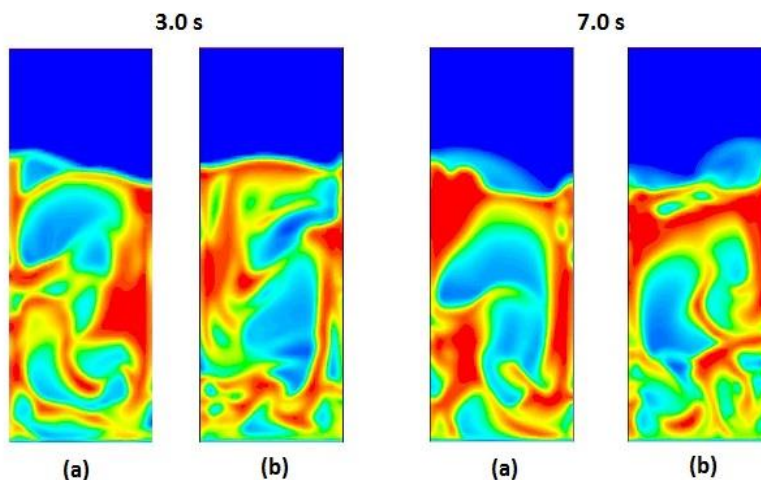
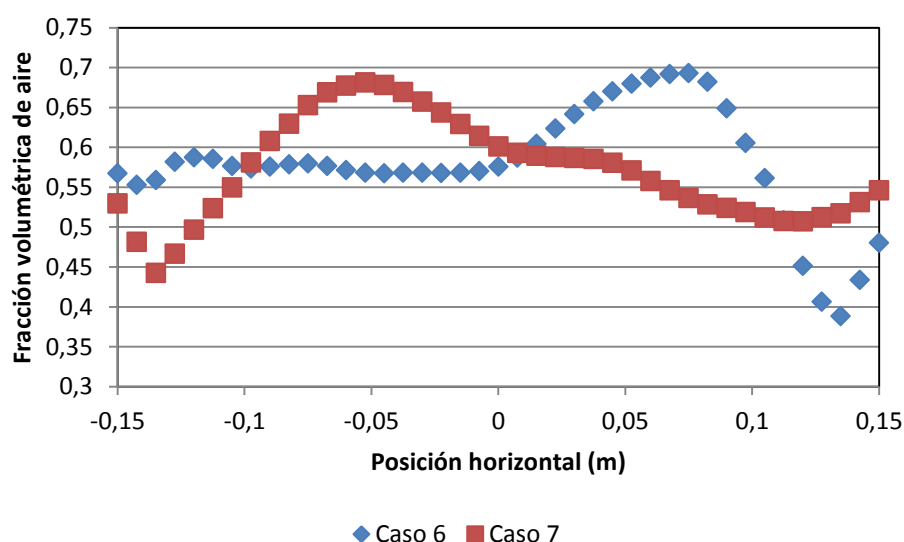


Figura 124. Mapas de fracción volumétrica de las partículas sólidas en  $t=3s$  y  $t=7s$ , (a) Caso 6, (b) Caso 7.

Según la Figura 124, tanto en el caso con aire incompresible (a), como el caso con aire compresible (b), se ha obtenido un lecho estable, con burbujas bien definidas y uniformes. También se puede apreciar cómo la altura que alcanza el lecho, es similar en ambos casos.

A continuación se procederá a resumir los resultados de la fracción volumétrica de aire sobre una línea de control situada a 20 cm del fondo del lecho (Figura 125). Se ha tomado esta línea de control debido a que es la que se encuentra situada a mayor altura, para tener el lecho más desarrollado y evitar así la influencia de la entrada de aire desde el distribuidor. Los resultados obtenidos a lo largo de las otras líneas de control se encuentran en el apartado 6.2.3.



**Figura 125.** Fracción volumétrica de aire,  $z=0.2\text{m}$ .

Se puede observar, cómo en el caso con aire compresible, Caso 7, la fracción volumétrica de aire tiene una forma más simétrica que en el caso con aire incompresible, Caso 6. Esto es debido a que la compresibilidad del gas amortigua parcialmente las oscilaciones del lecho en comparación con los resultados para un gas supuesto incompresible. Por consiguiente, la compresibilidad del gas se traduce en unos perfiles de velocidad más uniformes y mejor definidos (Figuras 126 y 127).



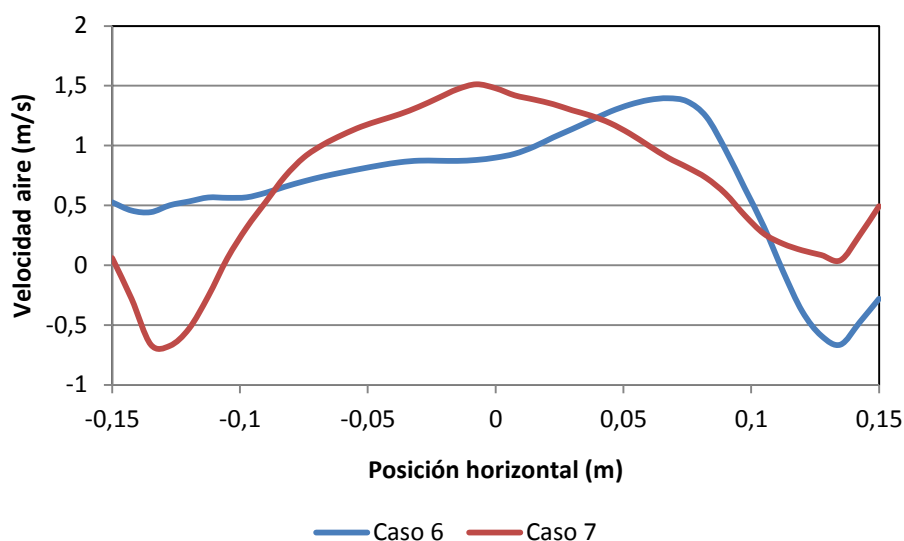


Figura 126. Velocidad vertical del aire,  $z=0.2m$ .

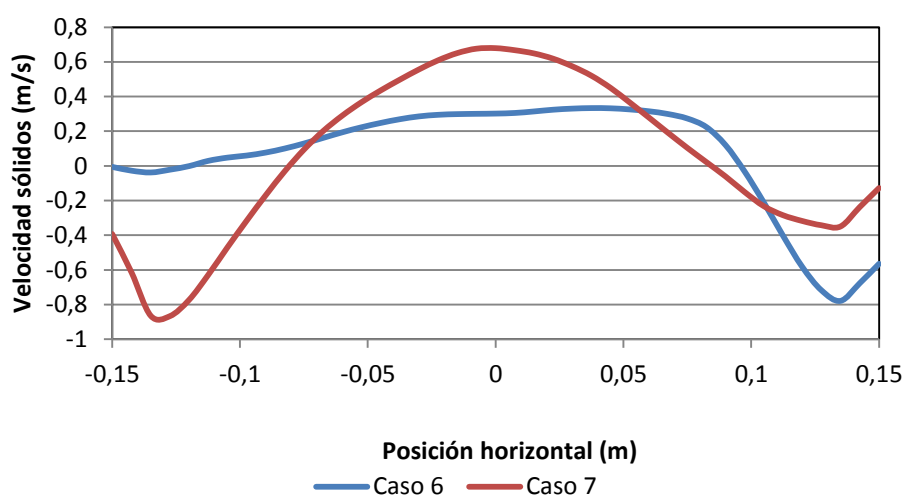
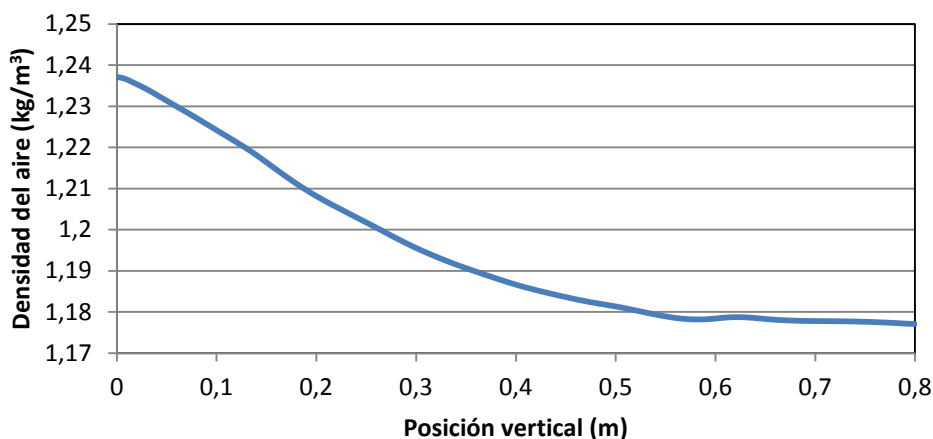


Figura 127. Velocidad vertical de las partículas sólidas,  $z=0.2m$ .

Se puede apreciar un perfil con mayor simetría y más uniformidad en las dos velocidades en el caso con aire compresible, Caso 7, esto es debido a que es un lecho más estable con oscilaciones más amortiguadas.

Como representación de la compresibilidad del aire, se ha caracterizado también los mapas de densidad en el lecho (apartado 6.2.6) así como la media temporal de la densidad en una línea de control vertical a lo largo del lecho y centrada en este (Figura 128). En la línea de control, se puede observar la variación de la densidad del aire desde el distribuidor hasta la superficie.

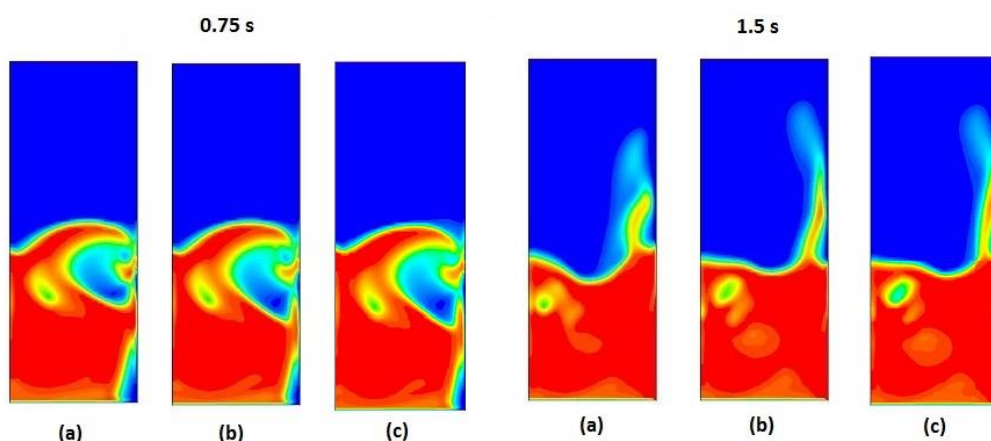


**Figura 128.** Densidad media del aire a lo largo del lecho fluidizado.

### 7.2.3. Incorporación de la transferencia de calor al lecho

Tras comprobar la consistencia del modelo de lecho fluidizado isoterma con aire compresible, resumida en el apartado anterior, se procedió a evaluar la incorporación de la transferencia de calor desde una pared a mayor temperatura al lecho y cómo se veía afectado el lecho al incluir la compresibilidad del aire. Este bloque de simulaciones se puede asemejar al comportamiento obtenido con el movimiento de masas de partículas en un lecho fluidizado. Estas masas de partículas suelen moverse con un tiempo de reposición del orden de 1 a 10 segundos. Las reposiciones a menudo ocurren de manera discontinua cerca de las superficies sólidas, pudiendo considerarse cada reposición como el inicio de un calentamiento transitorio de la masa de partículas.

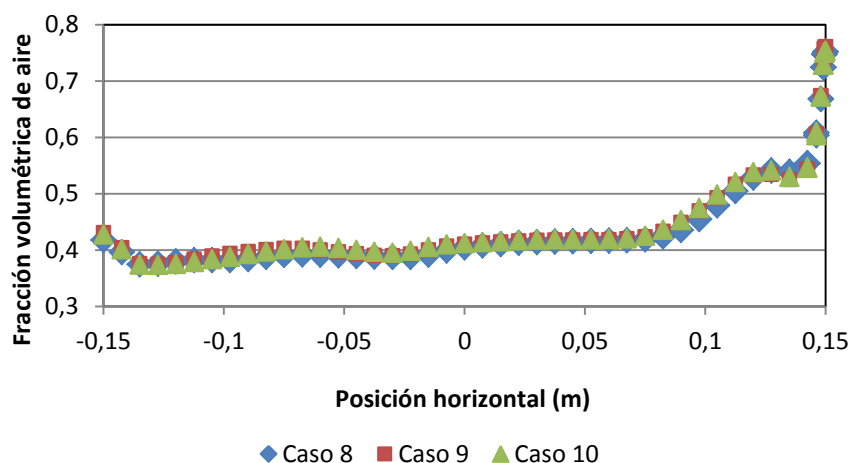
Como primer paso, se evaluó la fracción volumétrica de la fase sólida para comprobar la fluidización de los casos simulados (apartado 6.3.1), así como el grado de expansión de cada lecho (apartado 6.3.2).



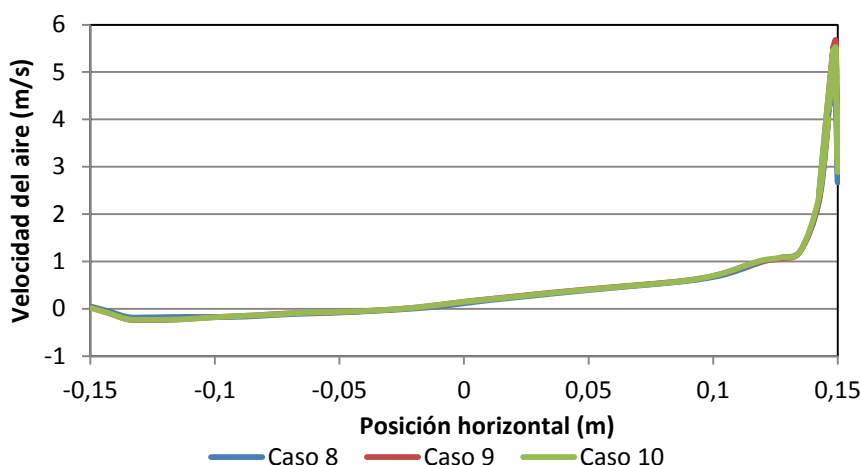
**Figura 129.** Mapas de fracción volumétrica de sólidos en  $t=0.75s$  y  $t=1.5s$ , (a) Caso 8, (b) Caso 9 y (c) Caso 10.

En la Figura 129, no se aprecia diferencia entre los casos con aire compresible ((b) y (c)) y el caso con aire incompresible (a). Los Casos 9 y 10 se diferencian en la interacción térmica entre el gas y las partículas. Esto se puede deber a que el lecho no está burbujeando completamente, ya que el aire entra a través del distribuidor con la velocidad de mínima fluidización y únicamente aparecen burbujas causadas por el chorro de gas pegado a la pared de la derecha. Debido a esta misma razón, tanto el perfil de fracción de volumen de aire, como los perfiles de velocidades, coinciden sobre las respectivas líneas horizontales de control.

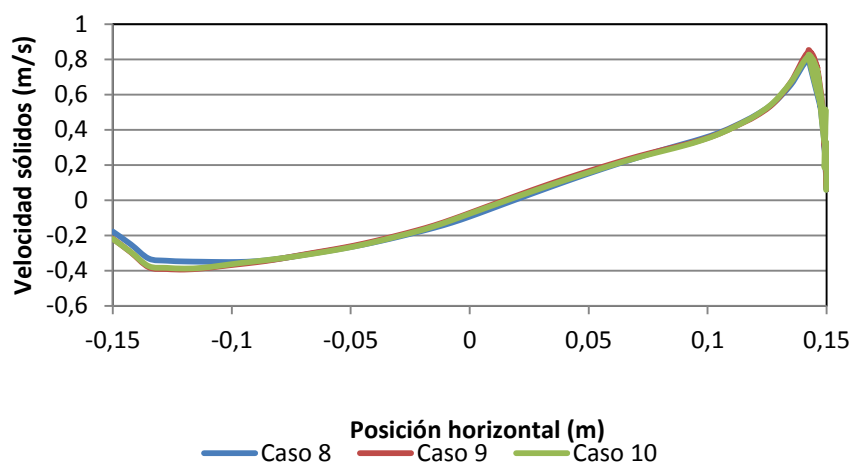
El perfil de fracción volumétrica de aire (apartado 6.3.3) a lo largo de la línea horizontal de control a 20 cm del distribuidor, se puede observar la coincidencia de los casos, además de la influencia del chorro (jet) de aire pegado a la pared derecha del lecho (Figura 130).



**Figura 130.** Fracción volumétrica de aire,  $z=0.2m$ .



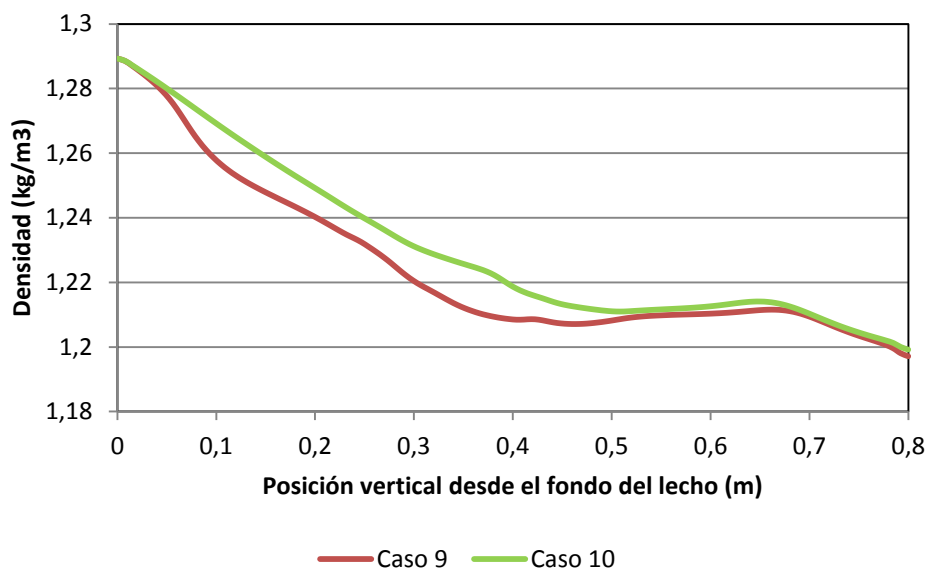
**Figura 131.** Velocidad vertical del aire,  $z=0.2\text{m}$ .



**Figura 132.** Velocidad vertical de las partículas sólidas,  $z=0.2\text{m}$ .

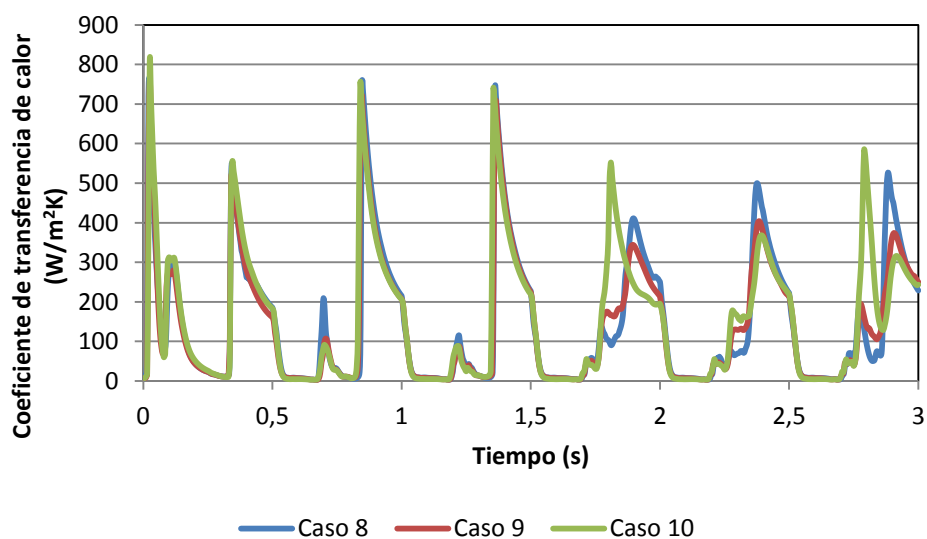
Como se puede observar, tanto en el perfil de velocidad vertical del aire (Figura 131), como el perfil de velocidad vertical de los sólidos (Figura 132), los valores de velocidad coinciden en los tres casos.

En la Figura 133, se representa la densidad media temporal del aire en los Casos 9 y 10 a lo largo de una línea de control vertical. En esta línea de control, se puede observar que existe diferencia entre los dos casos. Esto es debido a que la interacción térmica entre gas y partículas conlleva que se igualen las temperaturas del aire y de los sólidos, lo que significa un cambio en la densidad del aire. En concreto, la densidad del aire será menor, y su velocidad intersticial mayor, para la simulación con gas compresible en comparación con la simulación con gas tratado como incompresible. En el apartado 6.3.6 se pueden comprobar también los mapas de densidad de los dos casos.

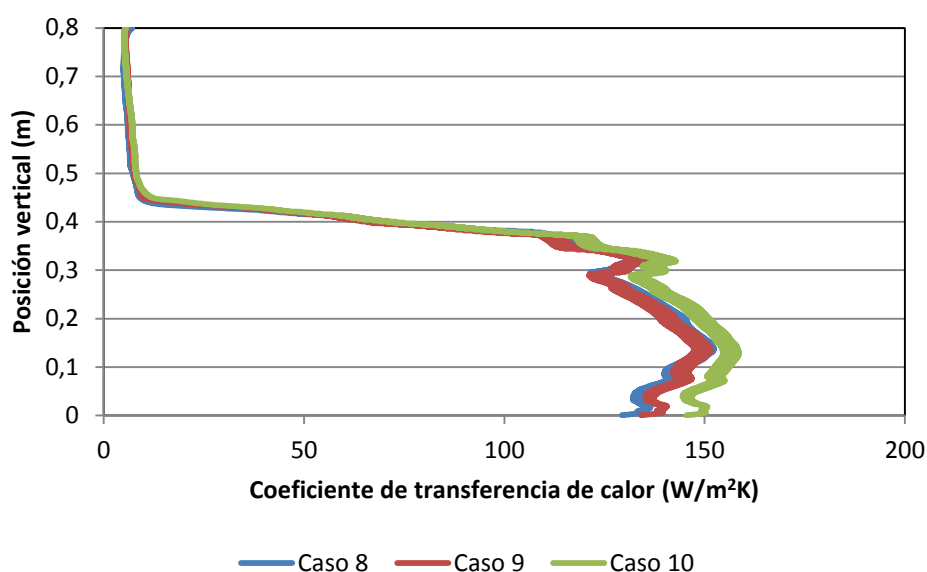


**Figura 133.** Densidad media del aire a lo largo del lecho fluidizado.

Se han tomado medidas del coeficiente de transferencia de calor,  $h$ , entre la pared y el lecho en un punto de control. Se comprueba cómo apenas existe diferencia entre los casos estudiados (Figuras 134 y 135), debido a que el lecho se comporta de igual manera al estar mínimamente fluidizado en su mayor parte (apartados 6.3.7 y 6.3.8). En la Figura 134 cada una de las oscilaciones principales del valor del coeficiente de transferencia de calor corresponde al paso de una burbuja pegada a la pared. Esto es debido a la agitación y mezclado de las partículas que provoca el paso de burbuja, lo cual aumenta el transporte de calor hacia las mismas.



**Figura 134.** Coeficiente de transferencia de calor en función del tiempo,  $z=0.092$  m.



**Figura 135.** Media temporal del coeficiente de transferencia de calor a lo largo de la pared.

Se ha calculado la media espacial a lo largo de la pared de la media temporal del coeficiente de transferencia de calor.

	Caso 8	Caso 9	Caso 10
$h$ (W/m <sup>2</sup> K)	71.50	71.77	76.22

**Tabla 16.** Media espacial del coeficiente de transferencia de calor.

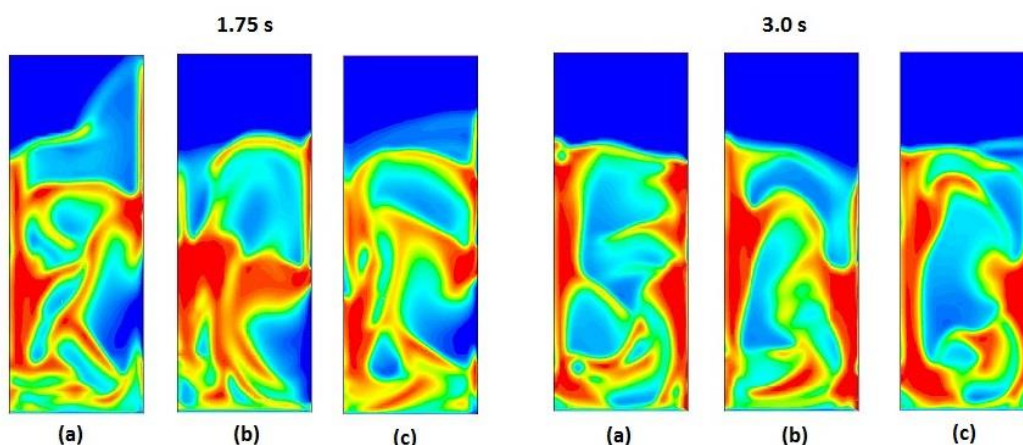
Como se puede observar en la Tabla 16, el valor medio del coeficiente de transferencia de calor en el Caso 10 es mayor que en los otros dos casos. Cuantificando esta variación, se obtiene que el coeficiente de transferencia de calor es un 6% mayor en el Caso 10 que en el resto de casos. Esto se debe a la citada interacción térmica entre el gas y las partículas.

#### 7.2.4. Lecho burbujeante con transferencia de calor

Después de comprobar la influencia de la compresibilidad del aire y del coeficiente de interacción térmica entre gas y partícula en un lecho parcialmente burbujeado se procedió a simular un lecho burbujeante en el que también se incluyó la transferencia de calor y se efectuó una comparación entre los casos con aire compresible y con aire incompresible. Al igual que las simulaciones del bloque anterior, los resultados de este

bloque pueden representar la transferencia de calor que aparece en un lecho mayor y cerca de una pared en donde existe un movimiento de masas de partículas con un tiempo de reposición del orden de 1 a 10 segundos.

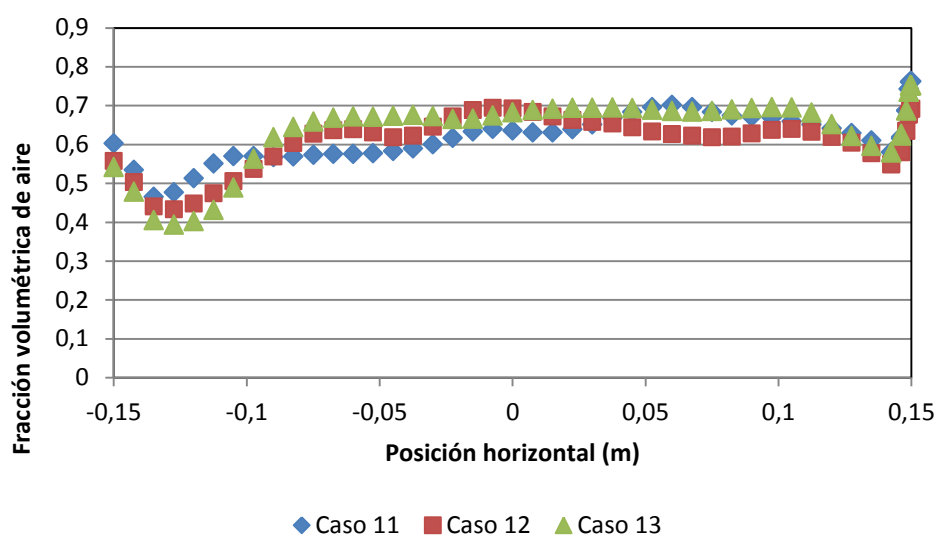
Mediante perfiles de fracción volumétrica de la fase densa, se ha comprobado cómo en los Casos 11, 12 y 13, se obtiene un lecho estable, con burbujas definidas y uniformes. El resto de perfiles de fracción volumétrica de sólidos y el grado de expansión del lecho en ambos casos, se representan en los apartados 6.4.1 y 6.4.2, respectivamente.



**Figura 136.** Mapa de fracción volumétrica de sólidos,  $t=1.75s$  y  $t=3.0s$ , (a) Caso 11, (b) Caso 12, (c) Caso 13.

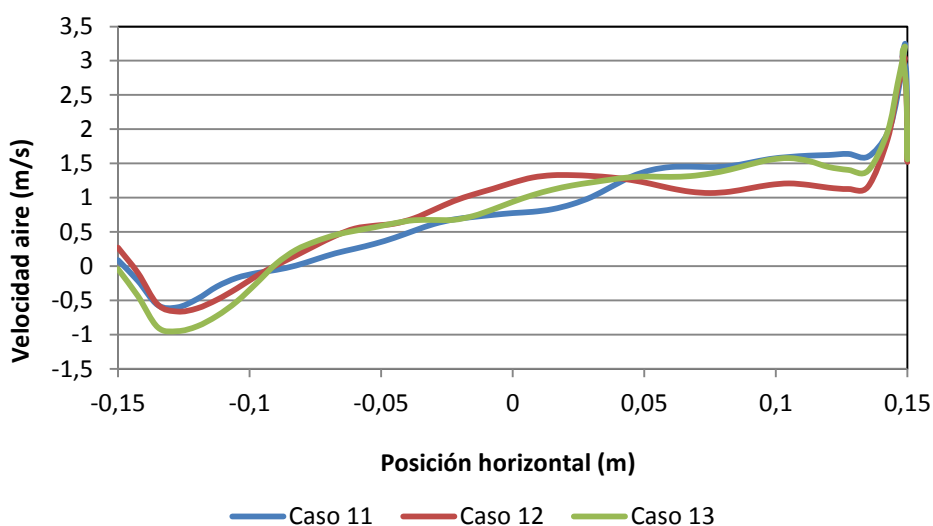
Según la Figura 136, tanto en el caso con aire incompresible (a), como en los casos con aire compresible ((b) y (c)), se puede observar cómo se ha obtenido una fluidización estable, con diferencias entre los casos visibles a partir del primer segundo. En todos los casos el lecho fluidizado está muy agitado debido a que el gas de fluidización tiene una velocidad íntegramente por encima de la de mínima fluidización.

La media temporal de la fracción volumétrica de aire en la línea de control situada a 20 cm, es uniforme, lo que indica que el paso de burbujas se ha producido por todo el lecho. El perfil medio de fracción volumétrica a distintas alturas se puede consultar en el apartado 6.4.3.



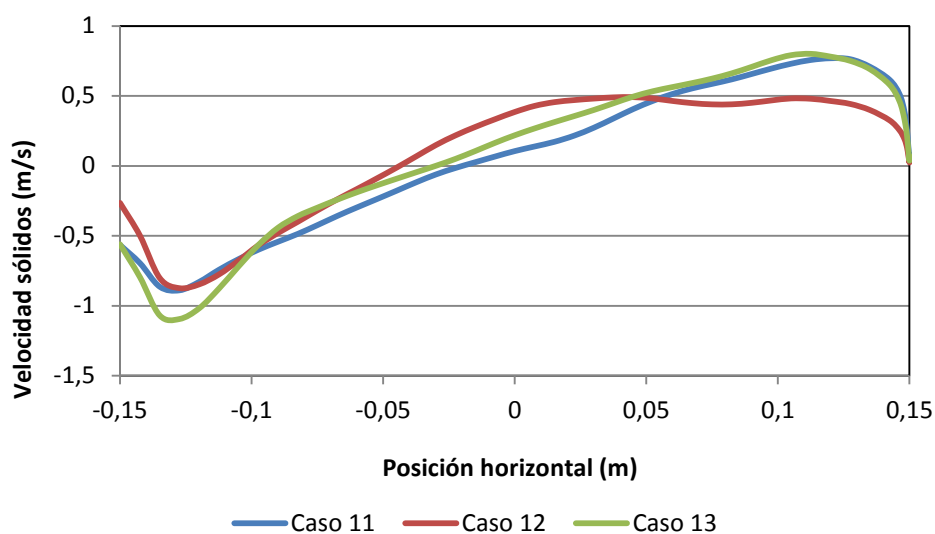
**Figura 137.** Fracción volumétrica de aire,  $z=0.2\text{m}$ .

La media temporal de la velocidad vertical del aire en la línea de control (Figura 138), tiene un perfil similar en los tres casos de este bloque, mostrando cómo influye en el lecho el chorro de aire a gran velocidad haciendo que aumente la velocidad en la zona de la pared. Ocurre de una forma similar en el caso de la velocidad vertical de las partículas sólidas (Figura 139).



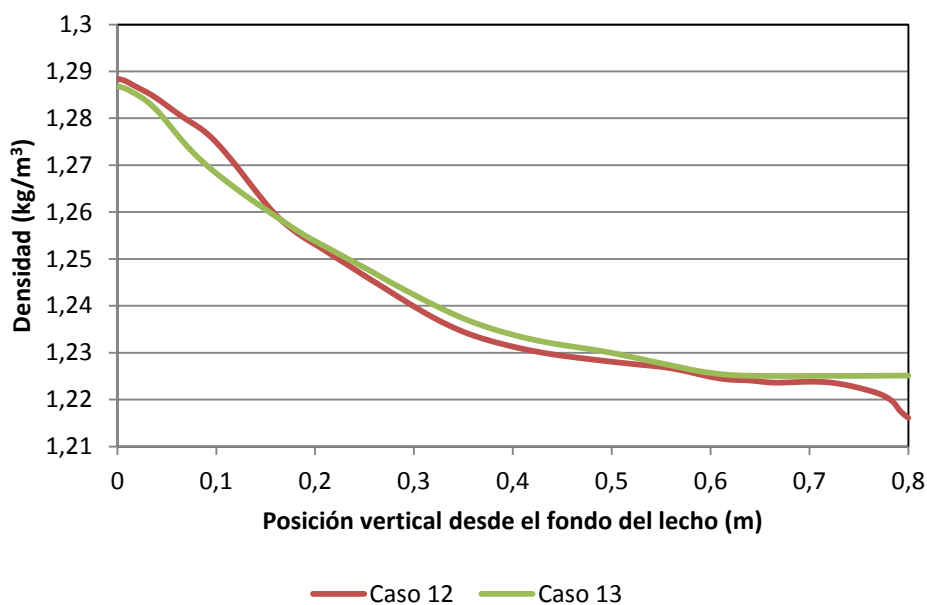
**Figura 138.** Velocidad vertical media del aire,  $z=0.2\text{m}$ .





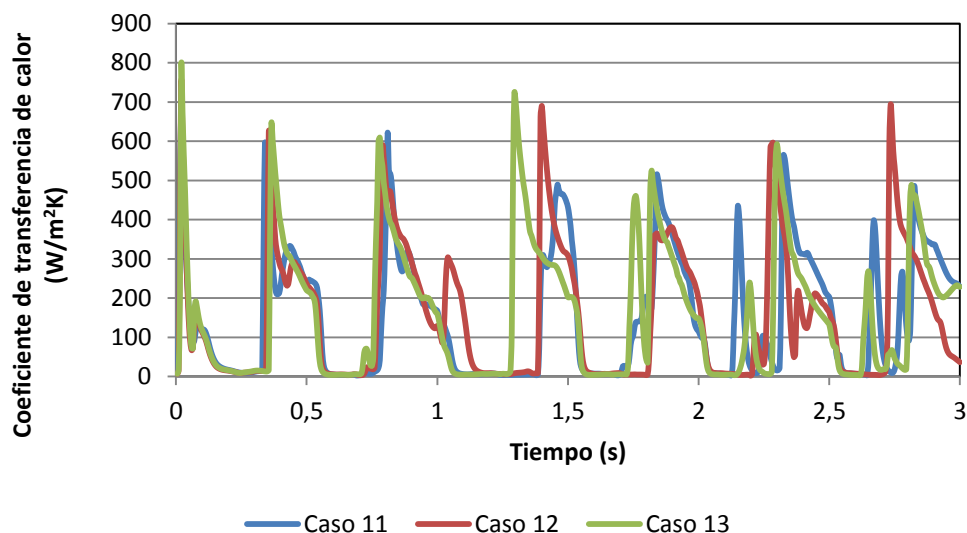
**Figura 139.** Velocidad vertical de las partículas sólidas,  $z=0.2\text{m}$ .

En el apartado 6.4.6 se muestran los mapas de densidad del aire y además la densidad media en la línea de control a lo largo del lecho (Figura 140). En esta línea de control se puede observar como la densidad del aire es muy similar en los Casos 12 y 13, por lo que no se aprecia la influencia de la interacción térmica gas-partículas en la densidad del aire.

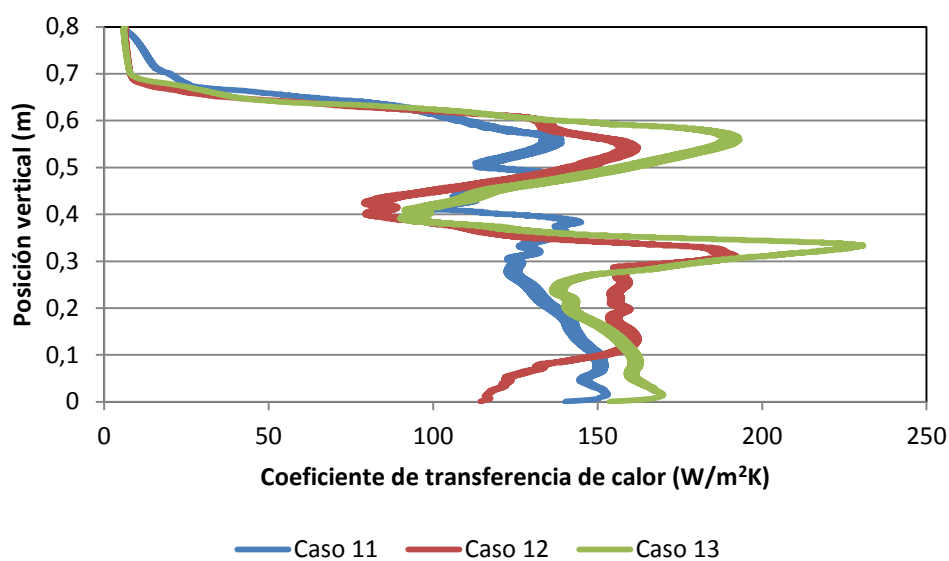


**Figura 140.** Densidad media del aire a lo largo del lecho fluidizado.

Respecto al coeficiente de transferencia de calor,  $h$ , se observa en la Figura 141 cómo coinciden los tres casos de este bloque al inicio de la fluidización. A partir de ese momento, en el cual los casos comienzan diferir y alcanzan sus valores pico en diferentes momentos de tiempo. El coeficiente de transferencia de calor medio, difiere entre los tres casos (Figura 142). Los resultados se pueden observar en los apartados 6.4.7, 6.4.8.



**Figura 141.** Coeficiente de transferencia de calor en función del tiempo,  $z=0.092\text{m}$ .



**Figura 142.** Coeficiente de transferencia de calor medio a lo largo de la pared.



En la siguiente tabla (Tabla 17), se han representado los valores medios espaciales del valor medio temporal del coeficiente de transferencia de calor a lo largo de la pared. Se observa, que el valor obtenido en el Caso 13 es un 12% mayor que el Caso 11, esta diferencia puede deberse al efecto de la compresibilidad del gas y de la interacción térmica entre las partículas y el gas. Por otro lado, la diferencia algo inferior (10%) entre el Caso 12 y el Caso 13 se debe únicamente a la activación en la simulación del Caso 13 de la interacción térmica entre las partículas y el gas. Con ello se comprueba que la contribución de la interacción térmica entre partículas y pared es responsable del 90% del valor del coeficiente de transferencia de calor  $h$ . Por consiguiente, la interacción entre gas y partículas únicamente contribuye con un 10% a aumentar el valor de dicho coeficiente.

	Caso 11	Caso 12	Caso 13
$h$ (W/m <sup>2</sup> K)	108.69	111.82	123.46

**Tabla 17.** Media espacial del coeficiente de transferencia de calor.

### 7.3. Conclusiones finales

La caracterización CFD de los lechos fluidizados es una herramienta muy útil para el conocimiento de las complejas características que poseen dichos sistemas. Además permite predecir de una manera eficiente el comportamiento dinámico de los lechos fluidizados. A pesar de esto, para lograr reproducir con gran fidelidad y detalle la física de estos procesos, es necesario contar con grandes recursos computacionales. También, para obtener un mayor conocimiento de las caracterizaciones CFD, es imprescindible contrastar los resultados obtenidos con procesos experimentales para, de esta manera, validar las simulaciones numéricas realizadas y poder usar los modelos con fiabilidad en otras situaciones. Los resultados obtenidos en el presente proyecto permiten concluir varios aspectos generales en relación a la simulación efectuada. Estos aspectos se describen a continuación.

En primer lugar, se buscaba validar el modelo de ecuaciones a utilizar y validar las caracterizaciones CFD de lechos fluidizados en comparación con un estudio ya publicado (Taghipour et al. 2005). En esta fase del proyecto, se encontró que la formulación del coeficiente de la fuerza de arrastre entre gas y partícula desarrollada por Gidaspow, tenía una convergencia más rápida que el modelo propuesto por Syamlal-O'Brien. Además, se comprobó visualmente que en los casos con formulación de Syamlal-O'Brien, las burbujas formadas eran más pequeñas y menos desarrolladas en comparación a las obtenidas con la formulación de Gidaspow. Debido a esto, se procedió a utilizar el modelo de ecuaciones propuesto por Gidaspow en las simulaciones realizadas a continuación.

En segundo lugar, en la búsqueda de mayor precisión del comportamiento de los lechos mediante la simulación con aire compresible, se han encontrado diferencias con respecto a las simulaciones con aire incompresible. Estas diferencias aparecen no solo en la distribución y las formas de las burbujas presentes en el lecho, sino también en el desarrollo de burbujas, así como en las velocidades de las fases presentes en el lecho. La mayor presión a la que se encuentra sometido el fondo del lecho en comparación con la presión sobre su superficie libre, hace que la densidad del aire entrante en el distribuidor sea la mayor del lecho. Esto conlleva que el aire, en su ascenso a la superficie, arrastre las partículas sólidas de forma diferente en la simulación con aire compresible en comparación con la simulación con aire incompresible, lo cual influye en la forma en que fluidiza el lecho, además de en sus propiedades características.

El caso parcialmente burbujeante y el caso totalmente burbujeante conducen a que el coeficiente de transferencia de calor entre la emulsión y la pared sea parecido. Por lo tanto el efecto dominante en todos los casos es la presencia de burbujas cerca de la pared. Los resultados obtenidos mediante la correlación de Gunn, indican a su vez que en el valor del coeficiente de transferencia de calor, la interacción gas-partícula no tiene tanta importancia como la inercia térmica que tienen los sólidos una vez calientes y su transferencia de calor directa por colisión con la pared.

#### 7.4. Estimación del coste del proyecto

La estimación del coste de realización del presente proyecto se basa en el periodo de uso de los recursos informáticos, de las horas de ingeniería necesarias y de las horas de consultoría al director del proyecto. Se tiene en cuenta la amortización de los equipos, la adquisición de las licencias de software y la renovación de las mismas. Otros gastos tales como la luz o el acceso a internet no se consideran para el cálculo del coste del proyecto.

El coste de realización del proyecto se calcula tal cual se detalla en la tabla siguiente. El resultado es un coste estimado de realización del proyecto de unos 21500 Euro.

Concepto	Cantidad	Periodo de uso	Coste unitario	Amortización anual (€)	Coste total (€)
Alquiler de sistemas informáticos	2 unidades	10 meses	750 €/año	312.5	625
Licencias académicas	3	10 meses	300 €/año	-	750
Renovación de licencias	3	-	150 €/año	-	375
Horas de ingeniero	1100	-	12.5 €/hora	-	13750
Consultas al Director de Proyecto	30 horas	-	200 €/hora	-	6000
				<b>TOTAL</b>	<b>21.500€</b>

**Tabla 18.** Coste de realización del proyecto.

#### 7.5. Críticas a los resultados

Durante la realización del proyecto, se encontraron numerosos retos a la hora llevar a cabo la simulaciones numéricas. Previamente, ya se sabía de la dificultad que conlleva este tipo de simulaciones, y a pesar de que los obstáculos encontrados fueron resueltos, el tiempo empleado en la computación de cada simulación y el elevado número de casos considerados, impidió poder ampliar el rango de tiempo de tiempo físico simulado.



Adicionalmente, de haber contado con mayores recursos informáticos, se podrían haber empleado estos modelos con mallas más finas para poder obtener una mayor precisión en los resultados.

También por cuestiones de exigencia computacional, el dominio considerado para el presente estudio es bidimensional. Aunque, tal cual se ha comentado anteriormente, es habitual considerar dominios de este estilo en estudios de simulación en lechos fluidizados, obviamente se trata de una aproximación a un problema tridimensional cuya completa resolución queda fuera del alcance del presente proyecto.

#### 7.6. Líneas futuras de investigación

Son varias las líneas de investigación que pueden abordarse para continuar con el estudio de la transferencia de calor de los lechos fluidizados iniciada en el presente proyecto. Estas líneas de investigación se describen a continuación y buscan obtener resultados más exactos así como caracterizar de forma más precisa el acople entre la dinámica y el transporte de calor de los lechos fluidizados burbujeantes.

- Estudio de la influencia del plenum y del distribuidor de aire en la caracterización de la transferencia de calor en lechos fluidizados con aire compresible. Esto incluye el estudio de las fluctuaciones de aire que se producen a la salida del distribuidor y como afecta la compresibilidad del gas.
- Caracterización del comportamiento del lecho ante diferentes caídas de presión en el distribuidor. El objetivo de esta línea es optimizar los procesos de transferencia de calor que empleen un distribuidor de aire con una caída de presión asociada. Para ello se propone la realización de simulaciones numéricas en las que se barra un rango de caídas de presión entre el 10% y el 100%.
- Estudio de los efectos de la transferencia de calor en un lecho fluidizado que incluya un sistema de tubos horizontales en el centro del lecho a mayor temperatura, en lugar de una pared vertical. De esta forma se propone extender los resultados aquí estudiados a geometrías de tubos como las usadas en calderas de lechos fluidizados.
- Simulación de la transferencia de calor en lechos fluidizados en dominios tridimensionales correspondientes a vasijas de tipo cilíndrico o prismático cuya geometría es más cercana a la usada en la industria. Con ello se podrían caracterizar los efectos de las paredes sobre el lecho de una forma más completa y cercana al proceso real.

## 8. REFERENCIAS

- ANSYS Fluent, 2014. ANSYS, Inc. Fluent User Guide 14.0. Recurso Online: <http://www.ansys.com/> (Último acceso 14-10-2014).
- R.C. Darton, R.D. La Nauze, J.F. Davidson, D. Harrison, 1977. Bubble growth due to coalescence in fluidised beds. Trans IChemE, 55, 274.
- J.F. Davidson, D. Harrison, 1963. Fluidised Particles, Cambridge University Press.
- R.M. Davies, S.G. Taylor, 1950. The Mechanics of Large Bubbles Rising Through Extended Liquids and Through Liquids in Tubes, Proceedings of the Royal Society A, 200 375 – 390.
- Fundación Ciudad de la Energía (Ciuden), 2014. Fundación Ciudad de la Energía. Recurso Online: <http://www.ciuden.es/index.php/es/tecnologias/tecnologias-cac/procesos-de-captura> (Último acceso 14-10-2014).
- D. Gidaspow, 1994. Multiphase Flow and Fluidization. Continuum and Kinetic Theory Descriptions, Department of Chemical Engineering Illinois Institute of Technology, Chicago, Illinois.
- D. J. Gunn, 1978. Transfer of Heat or Mass to Particles in Fixed and Fluidized Beds. Int. J. Heat Mass Transfer, 21:467-476.
- L. Huilin, H. Yurong, D. Gidaspow, 2003. Hydrodynamic modelling of binary mixture in a gas bubbling fluidized bed using the kinetic theory of granular flow. Chemical Engineering Science 58, 1197–1205.
- J.A.M. Kuipers, W. Prins, W.P.M. van Swaaij, 1992. Numerical calculation of wall-to-bed heat transfer coefficients in gas-fluidized beds. AIChE Journal Vol. 38, 1079-1091.
- D. Kunii y O. Levenspiel, 1991. Fluidization Engineering, segunda edición, Butterworth-Heinemann, Boston.
- D. J. Patil, J. Smit, M. van Sint Annaland, y J. A. M. Kuipers, 2006. Wall-to-Bed Heat Transfer in Gas–Solid Bubbling Fluidized Beds. A.I.Ch.E. Journal Vol. 52, 58-74.
- S. Sánchez-Delgado, 2010. Two Dimensional Fluidized Bed Dynamics, Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. Universidad Carlos III de Madrid.
- M. Syamlal, T.J. O'Brien, 1989. Computer simulation of bubbles in a fluidized bed. A.I.Ch.E. Symposium Series 85, 22–31.
- F. Taghipour, N. Ellis y C. Wong, 2005. Experimental and computational study of gas–solid fluidized bed hydrodynamics. Chemical Engineering Science 60, pp.6857-6867.
- W. Yang, 2003. Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems, CRC Press.